VALUTAZIONE DELLE PROPRIETA' MECCANICHE NEI MATERIALI IN ESERCIZIO CON PROVE DI LABORATORIO: LA FATICA TERMOMECCANICA

M. Marchionni, S. Budano

Le turbine a gas lavorano in condizioni operative estreme di temperatura e pressione per ottenere le massime prestazioni dell'impianto energetico. Tali requisiti possono risultare al limite delle condizioni di progettazione delle pale, dei cuscinetti e dei numerosi componenti presenti nella camera di combustione. Di conseguenza la loro vita in esercizio può risultare limitata, come verosimilmente risulta dalla frequenza delle fratture che tali componenti presentano rispetto alla minore incidenza verificabile in altre parti dell'impianto. I difetti, che insorgono in corrispondenza dello stadio delle pale della turbina esposto alla maggiore temperatura e pressione di lavoro, risultano attribuibili ai fenomeni di creep, di ossidazione e di danneggiamento per fatica. Inoltre non è ancora del tutto chiaro se queste azioni di danneggiamento agiscono in modo simultaneo o se alcune di esse risultano predominanti (come, quando e perché) rispetto ad altre che divengono meno influenti nel corso del danneggiamento per fatica termomeccanica (TMF).
I materiali svolgono il ruolo fondamentale per l'incremento della vita in esercizio degli impianti. A tale proposito la via dell'innovazione è stata intrapresa con lo sviluppo di superleghe a base nickel ottenute per solidificazione direzionale (DS) o monocristalline (SX) e con l'impiego di rivestimenti ceramici che fanno da scudo termico al materiale sottoposto alle temperature preservando le superfici esposte dei componenti dall'ossidazione a caldo. Essi consentono di aumentare la temperatura di funzionamento degli impianti e, conseguentemente, di aumentarne il rendimento.
Il vantaggio ottenuto dallo sviluppo dei nuovi materiali e dei rivestimenti va attentamente valutato mediante la messa a punto di nuove tecniche diagnostiche simulanti le condizioni di lavoro dei componenti e, in tale ambito, la fatica termomeccanica (TMF) ha dimostrato di essere un ottimo strumento diagnostico complementare di quello della fatica LCF, sinora più diffuso. Nella memoria sono descritte le procedure per l'esecuzione di prove TMF ed alcuni esempi di confronto tra TMF ed LCF per alcuni materiali innovativi impiegati in componenti turbogas.

PAROLE CHIAVE: le

INTRODUZIONE

Le turbine a gas lavorano in condizioni operative estreme di temperatura e pressione per ottenere le massime prestazioni dell'impianto energetico. Tali requisiti possono risultare al limite delle condizioni di progettazione delle pale, dei cuscinetti e dei numerosi componenti presenti nella camera di combustione. Di conseguenza la loro vita in esercizio può risultare limitata, come verosimilmente risulta dalla frequenza delle fratture che tali componenti presentano rispetto alla minore incidenza verificabile in altre parti dell'impianto.

M. Marchionni
CNR-IENI, Milano
S. Budano
Centro Sviluppo Materiali, Roma

I difetti, che insorgono in corrispondenza dello stadio delle pale della turbina esposto alla maggiore temperatura e pressione di lavoro, risultano attribuibili ai fenomeni di creep, di ossidazione e di danneggiamento per fatica. Inoltre non è ancora del tutto chiaro se queste azioni di danneggiamento agiscono in modo simultaneo o se alcune di esse risultano predominanti (come, quando e perché) rispetto ad altre che divengono meno influenti nel corso del danneggiamento per fatica termomeccanica (TMF).
Questo stadio delle pale di turbina risulta quindi una parte dell'impianto a vita limitata e richiede procedure di manuten-

zione, di sostituzione di parti ad intervalli di tempo definibili in base ai cicli termici e meccanici dell'esercizio.
I materiali svolgono il ruolo fondamentale per l'incremento della vita in esercizio degli impianti. A tale proposito la via dell'innovazione è stata intrapresa con lo sviluppo di superleghe a base nickel ottenute per solidificazione direzionale (DS) o monocristalline (SX) e con l'impiego di rivestimenti ceramici che fanno da scudo termico al materiale sottoposto alle temperature preservando le superfici esposte dei componenti dall'ossidazione a caldo. Essi consentono di aumentare la temperatura di funzionamento degli impianti e, conseguentemente, di aumentarne il rendimento.
Il vantaggio ottenuto dallo sviluppo dei nuovi materiali e dei rivestimenti va attentamente valutato mediante la messa a punto di nuove tecniche diagnostiche simulanti le condizioni di lavoro dei componenti e, in tale ambito, la Fatica Termomeccanica (TMF) ha dimostrato di essere un ottimo strumento diagnostico complementare di quello della fatica LCF, sinora più diffuso.

BREVE STATO DELL'ARTE

Notevoli sforzi sono profusi per ottenere materiali ad elevate prestazioni in presenza dell'azione combinata dei cicli di carico e termici.
Relativamente ai materiali innovativi, Manson nel simposio ASTM dell'ottobre 1985 [1], li classificò come la 'Driving Force' necessaria al progresso degli impianti che lavorano ad elevata temperatura ('specialized service uses'). In particolare, per quanto riguarda le pale per turbina, i nuovi materiali che furono citati all'epoca risultano le: "Special Ni-base Alloy" e "Ultra-High temperature Alloy".
Manson evidenziò che il loro impiego, o meglio la possibilità di sfruttare al meglio le caratteristiche intrinseche di questi nuovi materiali, dipende dai risultati ottenibili dallo studio delle loro specifiche performances e dei meccanismi di frattura operanti, e quindi controllabili, sotto l'applicazione dei cicli termici e meccanici.
Il primo lavoro sulla TMF pubblicato dalla ASTM risale già al 1968, ed è raccolto nel volume STP 459. Nel 1991 si svolse, sotto egida dell'ASTM, la prima conferenza dove vennero relazionate le attività svolte dall' E.9.01.01 Task Group on Thermomechanical Fatigue [2].
I lavori e le esperienze maturate evidenziano che i principali problemi incontrati in molte applicazioni come nei motori endotermici, nei componenti strutturali utilizzati nei trasporti ad elevata velocità e le problematiche dell'attrito per contatto ecc., sono riconducibili al danneggiamento operato dalla fatica termomeccanica. Dalla conferenza emerge che la tematica della TMF risulta una nuova sfida tecnica sia per il metallurgista che per lo sperimentatore.
Per il metallurgista la TMF risulta un utile strumento per rappresentare le equazioni costitutive del materiale sottoposto a sollecitazioni interne, invecchiamento, ingrossamento della microstruttura, ecc.
Fu infatti osservata la differenza nell'evoluzione di detti fenomeni tra l'applicazione di sforzi statici e dinamici, tra temperatura isoterma e ciclica.
Per lo sperimentatore la sfida risulta nella conduzione delle prove TMF, ottenendo la reale, ripetitiva ed affidabile simultanea riproduzione dei cicli termici e di deformazione imposti dalle condizioni operative dei materiali.
Dal punto di vista metodologico alcune componenti del layout di prova sviluppato alla NASA e presentato da Castelli ed Ellis [3] risultavano, nel 1991, già al passo con i tempi attuali.
La tipologia della provetta progettata, insieme al sistema di afferraggi delle teste MTS a presa idraulica e al sistema di riscaldamento ad induzione rappresentano ancora l'attuale stato dell'arte a cui fare riferimento.
Il gruppo di lavoro ASTM Committee E-08 on Fatigue and Fracture ha proseguito in tal senso svolgendo un secondo simposio on TMF Behaviour of Material nel novembre del 1994 [4].
Ancora una volta viene ribadito che l'innovazione dei materiali non può prescindere dalla loro caratterizzazione in accordo alle esperienze acquisite nell'esercizio operativo dei componenti che lavorano sotto la simultanea azione dei cicli di temperatura e di stress.
Infatti, risulta necessario caratterizzare i materiali per valutarne la vita in esercizio, per migliorare la progettazione dei componenti e per sviluppare dei nuovi materiali più performanti all'effetto unico e sinergico dei cicli termici e meccanici.
L'evoluzione nella progettazione dei materiali di nuova generazione, in termini di elevate caratteristiche di resistenza ad elevate temperatura e quindi utilizzabili per impieghi in turbine a gas, inizia ad essere pubblicata uscendo dall'ambito della riservatezza, conseguenza dell'elevato costo dei programmi industriali di sviluppo e ricerca intrapresi per lo sviluppo dei nuovi materiali.
Nel congresso ASTM del 1994 sono riportati i risultati della qualificazione meccanica eseguita con prove TMF utilizzando provette di superleghe single crystal a base di nickel con renio del tipo CMSX6 [5], CMSX4 [6] e SRR99 [7]. Inoltre, risulta già predominante l'impiego delle tecnologie dei rivestimenti ceramici utilizzati come isolanti termici e protettivi del metallo base. Il beneficio da loro indotto risulta valutato sperimentalmente per mezzo delle prove TMF [4].
Nella successiva conferenza ASTM, i cui atti sono riportati nel 3° volume ASTM-STP 1371 edito a marzo 2000 [8], si prende coscienza dell'ampio interesse che la fatica termomeccanica provoca nell'ambiente scientifico ed ingegneristico. Le tematiche relazionate riguardano lo studio della fase di innesco e crescita dei difetti in relazione al tipo di microstruttura, lo studio e lo sviluppo di modelli matematici per la previsione del danneggiamento operato dai cicli TMF.
Risulta interessante il fatto che una sessione del congresso è stata appositamente focalizzata sulle tecniche sperimentali, con particolare riguardo ai risultati ottenuti dalle prove interlaboratorio eseguite in ambito europeo, su acciai al 9Cr, a cui ha partecipato il laboratorio dell'ENEA della Casaccia ed altri 3 laboratori europei [9]. Diverse tipologie di provette e di layout di prova sono stati considerati, mentre è stato fissato il ciclo out-of-phase come ciclo TMF, negli intervalli di $200°C \leq T \leq 600°C$ e $0.34\% \leq \Delta\varepsilon_{mec} \leq 0.61\%$ rispettivamente di temperatura e di deformazione meccanica. La dispersione dei risultati ottenuti, in termini di vita a fatica, è stata soddisfacente.
Tuttavia gli autori concludono sottolineando la necessita di definire uno standard per la conduzione delle prove TMF.
La 4a conferenza ASTM sulla TMF si svolse nel 2001 [10] ed è chiaramente dichiarata la necessità e la richiesta da parte della stessa ASTM e dell'ISO di uno standard che faccia da riferimento per lo sperimentatore. Sempre più interessanti ed approfondite risultano le informazioni derivanti da questa tipologia di prova al fine di individuare i meccanismi di danneggiamento operanti nel corso dell'applicazione dei cicli termici e meccanici sia della lega base che del rivestimento ceramico, dei modelli previsionali di vita.
Relativamente allo standard esso viene pubblicato nel 2004

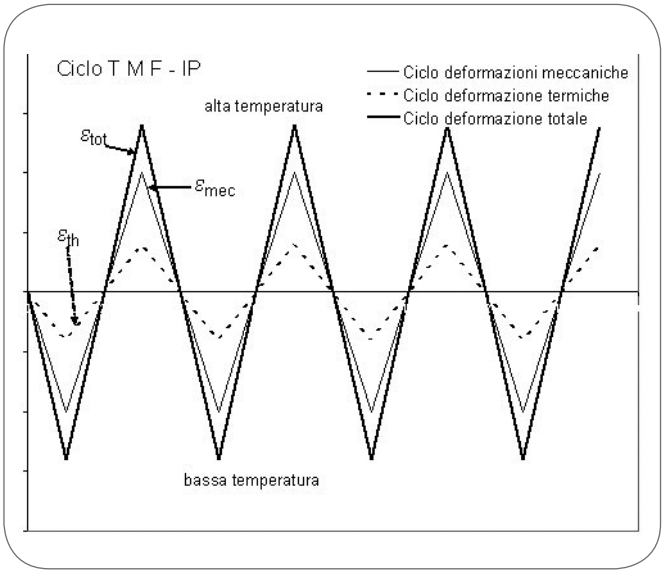

Fig. 1 ***Ciclo TMF-IP in-phase.***
TMF-IP in-phase cycle.

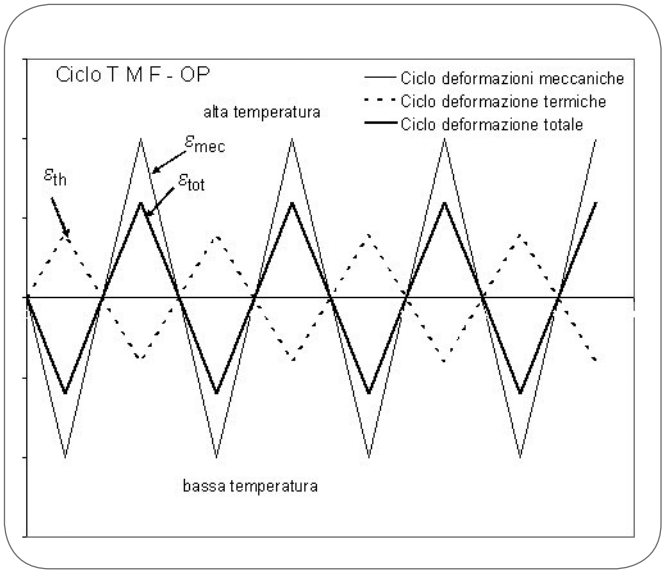

Fig. 2 ***Ciclo TMF-OP out-of-phase.***
TMF-OP out-of-phase cycle.

con numero di riferimento E2368.
Anche a livello europeo è stata avvertita l'esigenza di ottenere un protocollo di standardizzazione delle prove di fatica termomeccanica. A questo scopo nel 2000 è stato approvato un progetto europeo dal titolo "Thermomechanical fatigue: the route to standardisation (TMF-STANDARD)". Scopo di tale progetto è la verifica delle condizioni sperimentali adottate nei vari laboratori europei per l'esecuzione di prove TMF e, in base ai risultati ottenuti, definire un "Code of Practice" (CoP) per la standardizzazione della procedura di prova TMF. Tale progetto, completato nella seconda metà del 2005 ha consentito di produrre un documento, con il contributo di dieci laboratori europei partecipanti, nel quale sono state descritte le procedure necessarie ed alcuni suggerimenti per l'esecuzione di prove TMF in modo da rendere confrontabili i risultati ottenuti in laboratori diversi e soprattutto di documentare opportunamente eventuali procedure adottate diverse da quelle standard proposte.
La validità dell'attività svolta è risultata evidente soprattutto per il confronto tra le varie tecniche adottate nei rispettivi laboratori. Una volta confrontati i dati di prove TMF ottenute nelle medesime condizioni (intervallo di temperatura 400 – 850°C, forma d'onda triangolare, ciclo OP di 180 s, deformazione meccanica ±0.4 %) sullo stesso materiale (Nimonic 90), è stato possibile trovare un protocollo di prova per unificare la procedura stessa. Alcune prove successive di verifica, eseguite applicando la procedura descritta nel CoP [11], ha confermato la confrontabilità dei risultati nonostante la complessità delle prove TMF e le varie metodologie adottate nei laboratori coinvolti.
I risultati ottenuti sono stati illustrati nel corso di un workshop tenuto nel 2005 ed alcuni di essi sono in corso di pubblicazione sulla rivista International Journal of Fatigue.

DESCRIZIONE DELLA PROVA

Nella prova TMF il provino è sottoposto a dei livelli imposti di temperatura e di deformazione meccanica con differenza di fase. La rappresentazione di tale differenza che può essere simulata tra ciclo di temperatura e di deformazione risulta compresa tra il ciclo che può essere in fase od in opposizione di fase. Nel ciclo in fase, in-phase (IP), il massimo valore di deformazione è applicato in corrispondenza del valore massimo di temperatura (fig. 1). Nel ciclo in opposizione di fase, out-of-phase (OP), il massimo valore di deformazione è imposto in coincidenza del valore minimo di temperatura (fig. 2).
Mediante l'applicazione delle 2 tipologie di ciclo, è possibile riprodurre la maggior parte dei meccanismi di danneggiamento che si sviluppano nei componenti sottoposti alla TMF. Nei cicli riportati nelle figg. 1 e 2 la deformazione meccanica εmec deve corrispondere alla somma della componente elastica e plastica. Di conseguenza la deformazione totale εtot , misurata nel corso della prova, risulta dalla somma della componente termica e meccanica.

$$\varepsilon tot = \varepsilon th + \varepsilon mec = \alpha(T-T0) + \varepsilon mec$$

dove:
εth = deformazione termica;
(T-T0) = gradiente del ciclo termico (Temperatura massima meno Temperatura minima);
α = coefficiente di dilatazione termica del materiale in esame.
Sperimentalmente è necessario conoscere il valore della deformazione termica in funzione della temperatura, poiché essa può essere dipendente dall'impianto utilizzato. A questo scopo, prima di una serie di prove TMF, un provino di calibrazione è sottoposto al ciclo termico previsto e, dopo un numero di cicli necessari alla stabilizzazione del sistema, si registra la deformazione termica εth in funzione della temperatura T come media di n cicli registrati. La deformazione termica εth (T) può essere così sommata alla deformazione meccanica per determinare la deformazione totale da applicare.
Una volta determinata la deformazione totale da applicare sul provino nel corso della prova è importante, prima dell'avvio, verificare la correttezza delle impostazioni adottate. Un sistema molto efficace è quello di applicare al campione il ciclo di deformazione termica ricavato in fase di calibrazione (ciò corrisponde all'applicazione di un ciclo meccanico pari a zero).

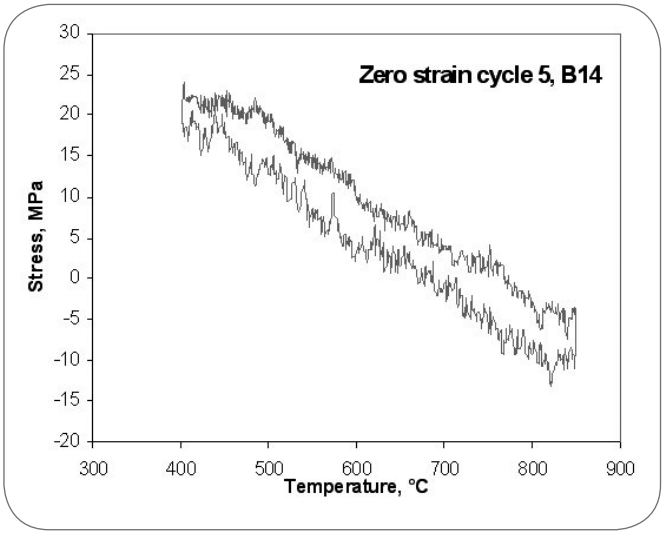

Fig. 3

Esempio di ciclo a "zero strain" per la lega Ni90.

Example of "zero strain" cycle for Ni90 alloy.

Se le condizioni di impostazione sono corrette, la risposta in sollecitazione del materiale deve essere approssimativamente zero. Un esempio di ciclo rilevato in tali condizioni è riportato in fig. 3.

Il materiale era Nimonic 90, il ciclo di temperatura di 180 s compreso tra 400 e 850°C. Una buona impostazione della prova corrisponde ad una risposta in sollecitazione compresa tra ± 50 MPa.

Appare chiaro che nella rappresentazione di base della fase tra i 2 cicli termico e meccanico, nel ciclo TMF-IP il materiale è sottoposto allo sforzo di trazione in corrispondenza del massimo valore di temperatura, mentre nel ciclo TMF-OP il materiale alla massima temperatura lo sforzo presente è in compressione.

Il ciclo TMF-OP simula le condizioni di lavoro delle turbine a gas per gli impianti di generazione di potenza.

La simulazione in laboratorio con la prova TMF può essere impostata variando lo sfasamento tra i cicli di temperatura e di carico o deformazione, con l'obiettivo di riprodurre in modo più fedele possibile le effettive condizioni di esercizio del componente. Un esempio è rappresentato dal ciclo a diamante riportato in fig. 4.

Per l'impostazione dei cicli TMF-OP utilizzabili per la caratterizzazione delle superleghe impiegate negli impianti turbogas è possibile fare riferimento ai lavori riportati in letteratura.

CONFRONTO TRA FATICA LCF E TMF

Il confronto tra LCF e TMF risulta molto importante, soprattutto per le nuove leghe, in quanto consente di verificare se, come era ritenuto alcuni anni fa, il comportamento a TMF poteva essere convenientemente descritto con prove semplificate di fatica isoterma LCF. Tale verifica risulta particolarmente importante nel caso di studio e progettazione di nuove leghe per le quali i dati a disposizione sono estremamente limitati.

In particolare, il NIMS (National Institute of Material Science, Giappone).[12, 13] ha definito un ciclo TMF per la caratterizzazione di superleghe di 2a, 4a e 5a generazione da eseguire

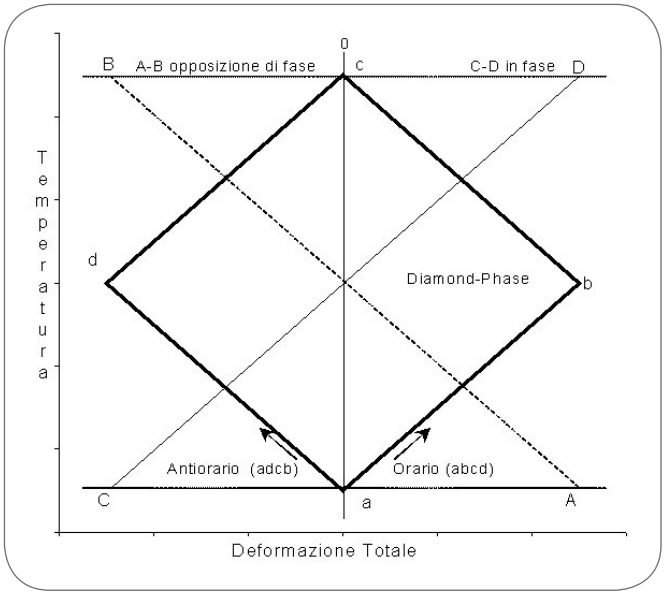

Fig. 4

Ciclo di temperatura e di deformazione impostabile nella prova TMF.

Example of different temperature and strain cycles for TMF tests.

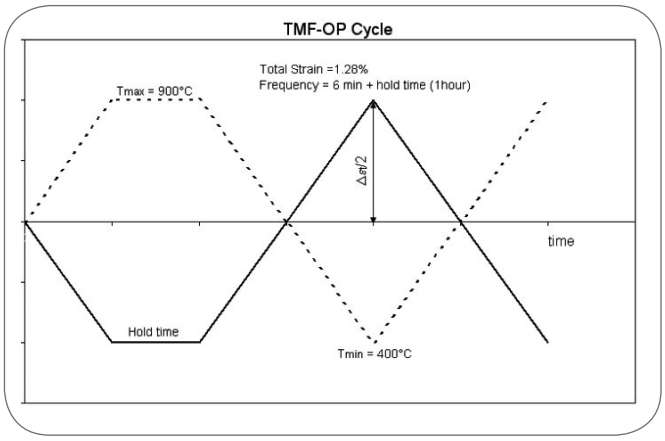

Fig. 5

Ciclo TMF-OP utilizzato per la determinazione delle proprietà meccaniche delle superleghe impiegate per la costruzione delle pale di turbina [11, 12].

TMF-OP cycle used for superalloys mechanical property evaluation of gas turbine blades and vanes.

in aria e nell'intervallo di temperatura 400°C e 900°C. A tali estremi del ciclo di temperatura corrispondono il massimo valore della tensione in trazione e compressione, rispettivamente: ciclo TMF-OP.

Inoltre il valore di deformazione totale è stato definito pari a εt=1.28% (±0.64%), applicato con un'onda triangolare ad una frequenza di 6 minuti per ciclo più 1 ora di old time a 900°C in compressione, fig. 5 .

I cicli TMF applicati hanno portato a rottura i campioni in prova nell'intervallo di cicli riportati nella Tab. 1.

I risultati indicano l'intera vita TMF del materiale (Cycles to Failure Nf) ed il rilassamento osservato per effetto del tempo di permanenza in corrispondenza del massimo valore di

Materiale	Cicli a Rottura,	Stress relaxation (MPa) (the smaller is the better)		
	Nf	N=1	$N=N_f/2$	$N=N_f$
Rene' N5	92	150	140	69
TMS-138°	124	140	60	45
TMS-196	198	20	10	

Tab. 1

Risultati delle prove ottenute con il ciclo TMF-OP definito da NIMS della lega di 5a generazione TMS-196 (ad elevato contenuto di Rutenio e Cr e fini aggiustamenti di Mo, W e Re) a confronto con la lega Rene' N5 (2a gen) e TMS-138A (4a gen). [12].
Tests results of TMF-OP cycle defined by NIMS on the 5th generation alloy TMS-196 (with high content of Ru and Cr and small modification of Mo, W and Re) compared with René N5 (2nd gen) and TMS-138A (4th gen) alloys.

Materiale	Proprietà	Impiego in turbine a gas	Tipo di Ciclo	Temperatura max, °C	Temperatura min, °C
MA 6000	ODS	Palette fisse	IP, OP, D1	1050	550
CMSX4+Y	Monocristallo	Palette rotanti	D2	1100	600
MA760	ODS	Palette fisse	D1	1050	550

Tab. 2

Materiali e tipo di prove TMF eseguite presso il CNR – IENI.
Materials and TMF tests carried out at CNR – IENI.

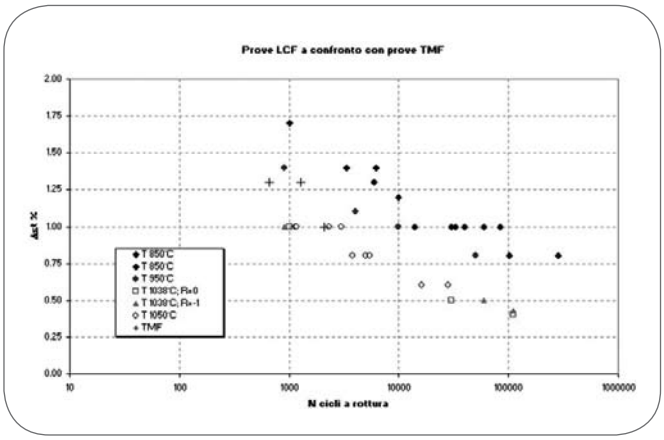

Fig. 6

Vita a fatica ottenuta con prove LCF e TMF di una superlega di 2a generazione.
LCF and TMF fatigue life of a 2nd generation superalloy.

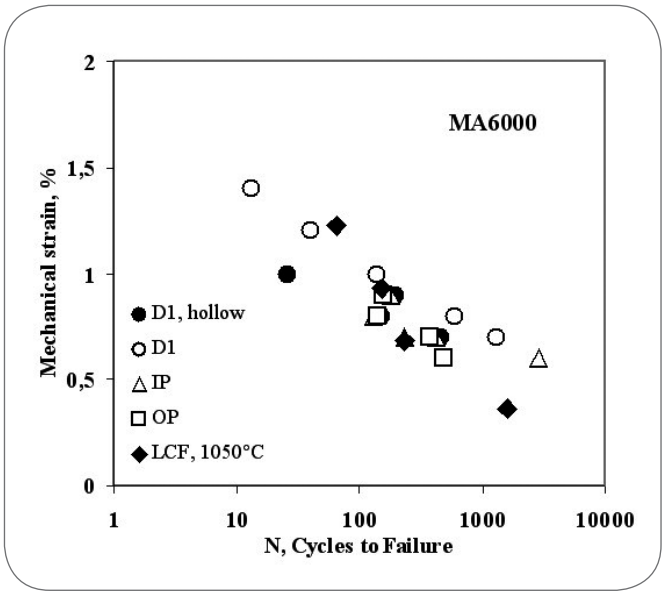

Fig. 7

Confronto tra TMF e LCF per la lega MA6000.
Comparison of TMF and LCF tests for MA6000 alloy.

temperatura del ciclo termico al primo ciclo N=1, a metà vita N=Nf/2 e a vita intera N=Nf.
In alcune circostanze sperimentali il danneggiamento esercitato dai cicli termomeccanici eseguiti in assenza di hold time risulta comparabile con il danno operato dai cicli meccanici applicati nel corso di una prova di fatica oligociclica (LCF) eseguita a temperatura costante.
In fig. 6 è riportato un insieme di risultati ottenuto da prove LCF eseguite al CSM su una superlega di 2 a generazione nell'intervallo di temperature 850-1050°C. In sovrapposizione è riportata la vita alla TMF ricavata simulando un ciclo termico tra 600 e 1050°C avente un periodo di circa 20 min e in assenza di hold time. I risultati TMF risultano posizionarsi all'interno della vita a fatica LCF isoterme. Il confronto tra vita LCF e TMF risulta un valido approccio al fine di validare i risultati ottenuti dalle prove TMF.
Anche presso il CNR-IENI sono stati studiati alcuni materiali per turbogas con particolare riferimento al confronto tra LCF e TMF [14, 15, 16]: un esempio dei materiali studiati è riportato in Tab. 2.
I risultati riportati in fig. 7 mostrano il confronto tra TMF e LCF su una superlega di nichel MA6000 solidificata direzionalmente ed indurita con ossidi dispersi (ODS).
Si può osservare che le prove sul campione pieno con forma d'onda quadrangolare (D1), hanno durate a fatica simili a quelle LCF a 1050°C fino a circa 200 cicli a rottura. Per durate superiori la resistenza a fatica in prove LCF è sensibilmente inferiore. Inoltre l'introduzione di un diverso ciclo TMF, IP ed OP e l'utilizzo di campioni cavi, riduce la vita a fatica in modo rilevante rispetto al ciclo di riferimento. I risultati descritti di-

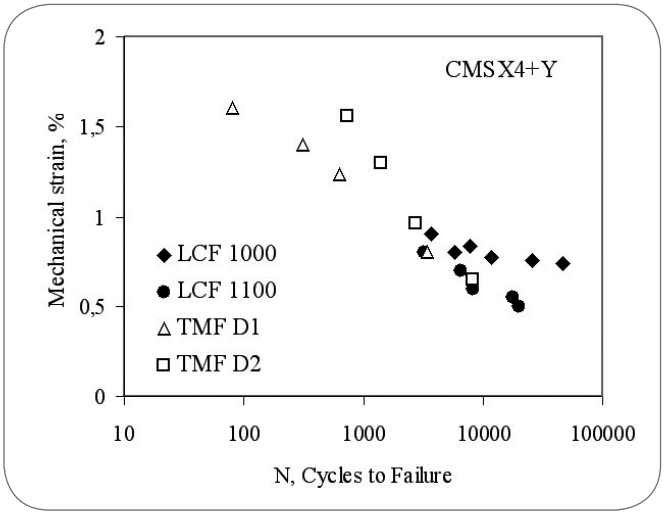

Fig. 8

Fatica LCF e TMF di una superlega di Ni monocristallina.

LCF and TMF fatigue of a single crystal Ni base superalloy.

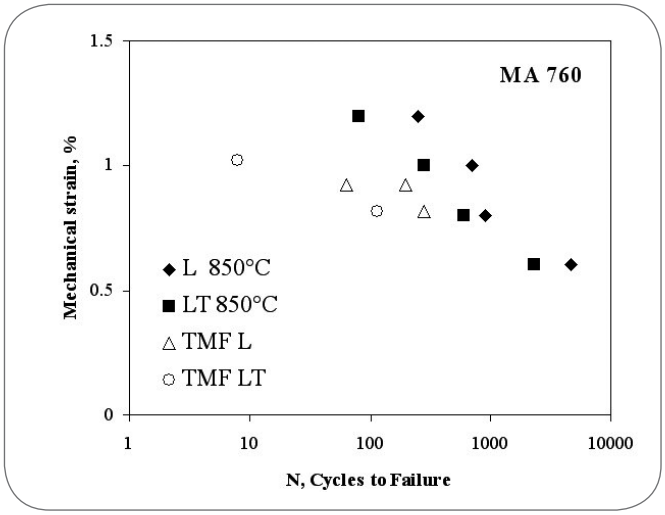

Fig. 9

Fatica TMF e LCF della lega MA760 nelle direzioni L e LT.

TMF and LCF fatigue of MA760 alloy in L and LT direction.

mostrano l'importanza della scelta del ciclo TMF da eseguire in laboratorio in funzione delle reali condizioni operative del materiale. Inoltre confermano che in questo caso l'impiego di prove LCF per prevederne il comportamento a fatica TMF porta a valori di riferimento inferiori a quelli reali.

Nel caso della lega monocristallina CMSX4+Y, riportato in fig. 8, la differenza tra LCF e TMF non è così evidente come nel caso precedente. Si può rilevare che la forma del ciclo quadrangolare TMF determina diverse resistenze a fatica, soprattutto a deformazioni imposte elevate. Per deformazioni inferiori a 0,8% le durate a fatica TMF sono praticamente coincidenti anche con la curva LCF ottenuta a 1100°C.

Poiché le deformazioni generalmente operanti nei componenti sono dell'ordine di 0,5% od inferiori, il comportamento della lega CMSX4+Y in condizioni di transienti termici può essere sufficientemente descritta con la curva LCF a 1100°C, anche se prove di TMF possono essere sempre di grande utilità per ulteriore conoscenza del comportamento del materiale ad elevata temperatura.

Nel caso della lega MA760, un'evoluzione della lega ODS descritta in fig. 7 per consentire di aumentarne la temperatura di impiego di circa 50°C, le durate a fatica TMF risultano inferiori di quelle LCF sia per il materiale nella direzione cristallografica longitudinale (L), sia in direzione trasversale (LT). Tale differenza risulta progressivamente ridotta al diminuire della deformazione imposta e potrebbe scomparire per deformazioni prossime a 0,5% od inferiori, come si può rilevare dall'andamento delle curve. In ogni caso, vista la sensibile anisotropia della lega, la conoscenza del comportamento TMF ed LCF nelle direzioni L ed LT è di grande interesse per una corretta progettazione dei componenti.

CONCLUSIONI

Una breve descrizione della metodologia per prove di fatica TMF ha confermato che si tratta di una tecnica sempre più utilizzata per la caratterizzazione di materiali innovativi per turbine a gas.

Alcuni esempi presentati hanno evidenziato come la fatica LCF, utilizzata fino a poco tempo fa quale metodologia principale per la descrizione del materiale sottoposto a transienti termomeccanici, in molti casi oggi potrebbe non essere sufficiente per una corretta progettazione dei componenti.

Pertanto, sebbene la tecnica TMF risulta sperimentalmente complessa e più costosa di quella LCF, se ne consiglia fortemente l'impiego per ottenere una migliore conoscenza del comportamento dei materiali ad elevata temperatura.

BIBLIOGRAFIA

[1] Manson S.S., "Future Direction for Low Cycle Fatigue", ASTM STP 942, editori Solomon, Halford, Kaisand e Leis, American Society for Testing and Materials, 1988, 15-39.

[2] ASTM STP 1186, Eds., Sehitoglu H. American Society for Testing and Materials, 1993.

[3] Castelli, M.G. and Ellis, J.R. "Improved Techniques for Thermo-Mechanical Testing in Support of Deformation Modeling" ASTM STP 1186 editore Sehitoglu H. American Society for Testing and Materials, 1993.

[4] ASTM STP 1263, Eds., Verrilli M.J. and Castelli M.G., American Society for Testing and Materials, 1996.

[5] Kraft, S .A. and Mughrabi H. "Thermo-Mechanical fatigue of the Monocrystalle Nickel Base Superalloy CMSX-6, Thermomechanical fatigue of Material: Second Volume, ASTM STP 1263, Eds. Verrilli and Castelli, American Society for Testing and Materials, 1996.

[6] Mayer-Olbersleben, F., et alii, "On Thermal Fatigue of Nicke-Based Supealloy", Thermomechanical fatigue of Material: Second Volume, ASTM STP 1263, Eds. Verrilli and Castelli, American Society for Testing and Materials, 1996.

[7] Bressers, J et al., "Effect of Cycle Type and Coating on TMF lives of a Single Crystal Nickel Based Gas Turbine Blade Alloy, Thermomechanical fatigue of Material: Second Volume, ASTM STP 1263, Eds. Verrilli and Castelli, American Society for Testing and Materials, 1996.

[8] ASTM STP 1371 Eds., Sehitoglu and Maier H.M. , Ameri-

can Society for Testing and Materials, West Conshohocken PA, 2000.
[9] Filacchioni et al. "A European Round Robin in Thermomechanical Fatigue Behaviour of a 9% Cr Low Activation Ferrite-Martensite Steel": Third Volume, ASTM STP 1371, Eds., Sehitoglu and Maier H.M. , American Society for Testing and Materials, West Conshohocken PA, 2000.
[10] ASTM STP 1428 Eds., McGaw M.A., Kalluri S., Bressers J., Peteves S.D., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken PA, 2002.
[11] Häener, P. et al., Validated Code of Practice for Strain – Controlled Thermo-mechanical Fatigue Testing, ISBN 92-79-02216-42, June 2006, 1-36.
[12] Sato A. et al, "A 5th generation Ni-Base Single Crystal Superalloy with Superior Elevated Temperature Properties". Material for Advance Power Engineering 2006. COST Proc. Of 8th Liege Conf. 18-21 Sept. 2006, Vol I, 287-298.
[13] Ohata H. et al, "Prediction of Thermal Mechanical Fatigue Properties of Ni-Base Single Crystal Superalloy" Material for Advance Power Engineering 2006. COST Proc. of 8th Liege Conf. 18-21 Sept. 2006, Vol I, 346-352.
[14] Marchionni M. et al., "Fatigue under Thermal and Mechanical Loading: Mechanisms, Mechanics and Modelling", Atti del convegno internazionale, Petten (NL), 1995, 169 – 178.
[15] Marchionni M. et al., Atti del convegno "Materials for Advanced Power Engineering", Liegi (B), Vol. II, 1994, 989 – 998.
[16] Marchionni M. et Al., "Journal of Material Engineering and Performances", Vol. 2(4) Agosto 1993, 497 – 503.

ABSTRACT

MECHANICAL BEHAVIOUR EVALUATION OF IN-SERVICE MATERIALS BY LABORATORY TESTS: THERMOMECHANICAL FATIGUE TESTING

Keywords:

The increasing of the already extreme temperature and pressure operative conditions leads to improve the gas turbines performance. The level of these conditions cold be not supported by components like vanes, blades, bearing and most components in combustion chamber designed by standard procedures. Therefore their in-service life could not meet the design parameters as it can be observed by the presence of more early failure in respect to other turbine gas components submitted to lower stressful operative conditions.
Regarding to the arise of the defects in the blades located at the first rows, and in presence of extreme operative conditions, the damage mechanisms are ascribed to main actions as: creep, oxidation and fatigue. Besides the state of art does not clarify if the damage is related to either their interactions or by a one or more single action (how, when ad why). The damage progression could lead some action to become less important for the component life, mainly during the damage of the thermo-mechanical fatigue damage (TMF).
Advanced mechanical properties play the leading role to improve the fatigue life of the power plants. Many efforts to develop new families of nickel-base superalloys have been profuse. Such way has led to develop nickel-base superalloys produced both by direction solidification (DS) and by single crystal (SX) processes. Moreover advanced ceramic coating represents a new way to improve the oxidation life of the blades operating at the extreme temperatures.
In order to assess the advantages obtained from these new technologies, new materials and coatings, advanced laboratory tests have been developed reproducing in the best way the operating conditions in term of temperature and stress cycling and oxidation action.
Thermomechanical Fatigue (TMF) tests confirms to be, actually, the best diagnostic tool complementary to isothermal LCF test, up to now more used.
The paper describes the laboratory equipment necessary to carry out TMF tests and the procedures to be adopted for performing standard TMF tests comparable among different laboratories.
Many examples of TMF curves have been reported. The results have been compared to TMF tests carried out from advanced nickel-base superalloys used to manufacture gas turbine vanes and blades. The difference between LCF and TMF tests confirms the extreme importance of this new type of investigation.