

IGF6 VI Convegno Nazionale
Gruppo Italiano Frattura
Ancona, 7 - 8 giugno 1990

FATICA DIPENDENTE DAL TEMPO IN UNA LEGA DI NICHEL
OPERANTE AD ELEVATA TEMPERATURA

G. Onofrio, M. Marchionni
CNR-ITM, Cinisello B. (Milano)

SOMMARIO

Sono stati analizzati gli effetti di tre trattamenti termici e del danneggiamento dipendente dal tempo sulla fatica oligociclica e sulla propagazione di cricca per fatica di una superlega di nichel tipo Inconel 718 alla temperatura di 650°C. Complessivamente il materiale con la struttura del grano più fine si è rivelato più resistente alla fatica oligociclica ed alla propagazione di cricca per fatica.

L'analisi comparativa di prove in aria ed in vuoto ha mostrato che la lega è sensibile a fenomeni di ossidazione mentre risulta trascurabile l'effetto dovuto al creep.

1. INTRODUZIONE

Le superleghe di nichel trovano largo impiego in componenti per turbine a gas sia per le loro elevate caratteristiche meccaniche sia per la resistenza all'ossidazione ad elevata temperatura /1/. In tali condizioni di impiego si possono verificare fenomeni di creep e di fatica che, aggravati dalla presenza di un ambiente ossidante, causano la rottura dei componenti in tempi anche molto brevi ed in alcuni casi senza preavviso /2/.

Nella progettazione dei dischi di turbina, ad esempio, rivestono molta importanza le sollecitazioni cicliche, causate dall'avviamento e dall'arresto dell'impianto, che determinano l'insorgenza di fenomeni di fatica oligociclica (elevate sollecitazioni a bassa frequenza) ai quali si sovrappongono fenomeni di fatica ad alto numero di cicli (basse sollecitazioni ad elevata frequenza) causati dalle vibrazioni delle parti in movimento e di sollecitazioni stazionarie (creep). Pertanto la vita in esercizio dei componenti risulta dipendere, oltre che dallo stato di sforzo, anche dalla frequenza delle sollecitazioni imposte, dall'effetto della temperatura e dall'ossidazione.

L'Inconel 718, studiato in questo lavoro, è una lega a base di nichel largamente utilizzata per la costruzione di dischi di turbina /3/. Le principali

proprietà di tale lega sono l'elevata resistenza fino a temperature di 700°C e la buona saldabilità, proprietà associate ad un costo relativamente basso /4/.

Nel presente lavoro vengono analizzati gli effetti di differenti dimensioni del grano (ottenute mediante tre trattamenti termici) e della frequenza sulla resistenza a fatica oligociclica ed alla propagazione di cricca per fatica dell'Inconel 718 a 650°C in aria ed in vuoto.

2. MATERIALE E METODOLOGIE SPERIMENTALI

La lega impiegata in questo studio è una superlega di nichel tipo Inconel 718 la cui composizione chimica è riportata in Tab. 1.

Tabella 1. Composizione chimica media percentuale in peso della lega Inconel 718.

Ni	Cr	Nb	Ti	Al	C	Fe
50-55	17-21	5,0-5,5	0,65-1,15	0,4-0,8	0,01-0,3	Resto

Essa viene diffusamente impiegata nella realizzazione di dischi di turbina a gas per impieghi aeronautici, ma l'elevata resistenza meccanica nell'intervallo 250-700°C e l'eccellente saldabilità rispetto ad altre leghe simili hanno favorito la sua utilizzazione anche in altri settori industriali /3/.

Per ottenere strutture con diverse dimensioni del grano sono stati applicati i seguenti trattamenti termici:

- struttura a grano grosso (LGS), ottenuta con solubilizzazione a 1093°C per 1 h, raffreddamento in forno fino a 720°C, invecchiamento a 720°C per 4 h, raffreddamento in forno fino a 620°C ed ulteriore invecchiamento a 620°C per 16 ore;
- struttura a grano medio (MGS), ottenuta con solubilizzazione a 950°C per 1 h e successivi trattamenti di invecchiamento come al punto a);
- struttura a grano fine (FGS), ottenuta mediante omogeneizzazione a 1150°C, forgiatura e formatura con temperatura al di sotto dei 1020°C, solubilizzazione a 950°C per 1 h, invecchiamento a 720°C per 8 h, raffreddamento fino a 620°C ed ulteriore invecchiamento a 620°C per 8 ore.

Le strutture ricavate nelle condizioni a) e b) si riferiscono a barrette forgiate e semilavorate, quella ottenuta nelle condizioni c) ad un disco di turbina del diametro di 700mm dal quale sono state tagliate, in direzione tangenziale, le barrette per l'ottenimento dei campioni.

La fig. 1a mostra la struttura LGS avente una dimensione media del grano pari 2 ASTM, la fig. 1b la struttura MGS con dimensione del grano pari a 6 ASTM e la fig. 1c la struttura FGS con dimensioni del grano pari a 9,5 ASTM.

Le esperienze di fatica oligociclica (LCF) e di propagazione di cricca per fatica (FCG) sono state condotte con un sistema prova materiali elettroidraulico a circuito chiuso. La temperatura di prova fissata a 650°C è stata ottenuta riscaldando i campioni per induzione con un forno a radiofrequenza. Le esperienze di LCF sono state eseguite su campioni a clessidra con diametro minimo di 8mm, in comando di deformazione diametrale, con forma d'onda triangolare, simmetrica rispetto allo zero ($R = -1$). Le prove su campioni con diversa dimensione del

grano sono state eseguite alla velocità di applicazione della deformazione di $10^{-2} s^{-1}$. Per il materiale FGS sono state eseguite prove a $10^{-2} s^{-1}$ e $10^{-4} s^{-1}$ in aria ed in vuoto con pressione di 10^{-3} Pa. Durante le esperienze sono stati registrati il ciclo d'isteresi e la risposta in sollecitazione al progredire del numero di cicli.

Le prove di FCG sono state condotte sul materiale LGS e FGS con campioni tipo SEN a sezione rettangolare 12mm x 4mm circa, sui quali veniva effettuato sul lato minore, mediante elettroerosione, un intaglio avente la profondità di 1mm e raggio di fondo intaglio 0,05mm. Le esperienze sono state eseguite in comando di carico con forma d'onda triangolare in trazione-trazione ($R=0,1$) e con frequenze variabili da 0,01 a 10 Hz. La propagazione della cricca è stata correlata al fattore di intensificazione delle tensioni ΔK . Le esperienze in vuoto sono state eseguite ad una pressione di 10^{-3} Pa.

3. RISULTATI SPERIMENTALI E DISCUSSIONE

3.1. Fatica oligociclica

La fig. 2 mostra le curve di fatica oligociclica della lega Inconel 718 nelle varie dimensioni di grano. Esse descrivono la deformazione totale imposta in funzione del numero di cicli a rottura. Da un esame del diagramma si può osservare che il passaggio dalla dimensione del grano LGS a MGS comporta una sensibile riduzione della vita a fatica. Per ciò che concerne la lega FGS essa risulta meno resistente delle precedenti alle alte deformazioni, mentre è più resistente per le basse deformazioni imposte.

In fig. 3 sono riportati i risultati di fatica oligociclica della lega in condizioni FGS a diverse velocità di applicazione della deformazione in aria ed in vuoto.

In aria, a parità di deformazione totale imposta, la durata a fatica diminuisce, con la riduzione della velocità di prova, di un fattore da 3 a 5 volte rispetto alle durate ottenute alla velocità di deformazione più elevata.

In vuoto si osserva una durata a fatica più elevata di quella osservata in aria ed una sensibile riduzione dell'influenza della velocità di prova. Si può pertanto asserire che i fenomeni che concorrono al danneggiamento del materiale in aria, oltre alla fatica, sono l'ossidazione e, in maniera quasi trascurabile, il creep. In vuoto l'ossidazione non è attiva, ma l'azione del creep alla velocità di applicazione della deformazione più bassa determina comunque una piccola differenza nel numero di cicli a rottura.

La fatica ad elevata temperatura è spesso accompagnata da fenomeni dipendenti dal tempo come il creep, l'ossidazione superficiale ed all'apice della cricca, le variazioni strutturali, ecc.. Numerosi ricercatori hanno tentato di razionalizzare tali fenomeni e di tenerne conto nelle varie equazioni costitutive proposte /5 - 9/. Tra questi Coffin e Manson /7/ hanno proposto una modifica alla loro equazione, introducendo la frequenza come parametro legato al creep:

$$\Delta \epsilon_p / \epsilon_f = C. (N \nu^{K-1})^\beta$$

nella quale $\Delta \epsilon_p$ è la deformazione plastica, N il numero di cicli a rottura, ϵ_f è

la duttilità ricavata da una prova tensile, ν la frequenza di prova espressa in cicli al minuto, C, K e β costanti caratteristiche del materiale. Il valore di K si ricava con la seguente espressione:

$$R = (100)^{1-K}$$

ove R è il rapporto delle durate a fatica di due esperienze eseguite a diversa frequenza ed a deformazione totale molto elevata ($\Delta \epsilon_p \gg \Delta \epsilon_e$) e 100 è il rapporto esistente tra le diverse frequenze o velocità di prova da noi scelte.

La fig. 4 riporta l'andamento della deformazione plastica rapportata con la duttilità in funzione del numero di cicli a rottura combinato con la frequenza per le prove in aria. Il valore di K per la lega Inconel 718 risulta 1,65. Nel diagramma sono riportati anche i valori di $C=0,79$ e $\beta = -0,50$.

Le rette tratteggiate parallele a quella principale sono state tracciate tenendo conto di una banda di dispersione pari a 2. Si può osservare che i punti sperimentali sono in accordo con l'equazione trovata, che risulta pertanto descrivere con sufficiente approssimazione il comportamento della lega in regime di dipendenza dal tempo.

3.2. Propagazione di cricca

Per una semplificazione dell'attività sperimentale l'influenza del trattamento termico sulla propagazione della cricca per fatica è stata valutata prendendo in considerazione le dimensioni estreme del grano: LGS e FGS. Tale decisione è stata suggerita dai risultati di fatica oligociclica per i quali il materiale MGS presentava un comportamento intermedio rispetto a quello rilevato nel materiale con le diverse dimensioni di grano.

In fig. 5a e 5b sono riportate le curve da/dN in funzione del fattore di intensificazione delle tensioni ΔK per il materiale LGS e FGS rispettivamente.

Nelle due diverse condizioni del materiale si nota un aumento della velocità di propagazione della cricca (FCGR) al diminuire della frequenza di prova; tale effetto risulta più marcato nel materiale con dimensione del grano maggiore.

La FCGR risulta aumentare sensibilmente in presenza di "hold time", come si può osservare nella fig. 5 per l'esperienza denominata 5-90-5 che prevede un tempo di mantenimento al carico massimo di 90 secondi.

Le fig. 6a e 6b mostrano il comportamento della lega nelle due condizioni di trattamento termico quando le esperienze sono eseguite in vuoto. In tali condizioni l'effetto della frequenza è fortemente ridimensionato: nel materiale FGS non si riscontra alcun effetto in tutto il campo di frequenza analizzato (fig. 6a); nel materiale LGS solo la prova con "hold time" dà luogo ad una velocità di crescita di cricca leggermente superiore, forse a causa di un livello di vuoto non sufficientemente elevato (fig. 6b).

Confrontando le figg. 5 e 6 si può affermare che, nelle condizioni sperimentali adottate, non sono operativi meccanismi di creep, mentre è l'ossidazione all'apice della cricca responsabile dell'aumento della velocità di propagazione al diminuire della frequenza.

3.3. Analisi frattografica

Ad elevata temperatura nelle superleghe di nichel la vita a fatica e la velocità di propagazione della cricca per fatica dipendono, oltre che dal numero di cicli, anche dalla durata del ciclo.

La lega Inconel 718, come mostrato nei precedenti capitoli, conferma tale comportamento.

Per ciò che concerne l'aspetto delle superfici di frattura, la durata del ciclo influenza sia l'inesco della cricca nella fatica oligociclica, sia il modo di propagazione in entrambe le metodologie di prova.

Nella fatica oligociclica non sono state osservate differenze significative nelle superfici di frattura del materiale sottoposto ai vari trattamenti termici. Generalmente la cricca enuclea sulla superficie esterna e propaga verso l'interno in modo transgranulare con la presenza di striature di fatica, la cui dimensione è più elevata sia a deformazione imposta maggiore, sia verso la zona di frattura finale. Per il trattamento FGS la maggiore durata del ciclo comporta una propagazione della cricca di tipo misto transgranulare ed intergranulare.

La fig. 7a mostra un esempio di propagazione transgranulare con la presenza di striature di fatica; in fig. 7b si può osservare un tipo di propagazione misto trasgranulare-intergranulare.

Un comportamento analogo si può osservare nelle prove di propagazione di cricca nelle quali si osservano fratture di tipo transgranulare con presenza di striature di fatica alle alte frequenze e di tipo intergranulare o miste alle frequenze più basse .

Una differenza significativa nell'aspetto della superficie di frattura per i diversi trattamenti termici è stata osservata nella prova con "hold time". Nel materiale LGS la frattura è totalmente di tipo intergranulare (fig. 8a), nel materiale FGS la frattura è di tipo prevalentemente transgranulare (fig. 8b). Pertanto il materiale FGS, offrendo un percorso più tortuoso alla penetrazione dell'ossigeno, appare più resistente alla propagazione intergranulare della cricca.

4. CONCLUSIONI

Le prove di fatica oligociclica e di propagazione di cricca per fatica a 650°C nella lega Inconel 718 hanno mostrato quanto segue:

- la riduzione della dimensione del grano, in generale, migliora la durata a fatica del materiale e riduce la velocità di propagazione della cricca per fatica;
- la diminuzione della frequenza di prova nel materiale FGS riduce la vita a fatica ed aumenta la velocità di propagazione della cricca per fatica;
- nelle prove in vuoto la sensibile riduzione dell'effetto della frequenza, l'aumento della vita a fatica e la diminuzione della velocità di propagazione della cricca per fatica indicano nell'ossidazione la causa principale del danneggiamento;
- il materiale LGS risulta più sensibile al danno provocato dall'ossidazione. Si osserva infatti, al diminuire della frequenza, una transizione della propagazione da transgranulare ad intergranulare associata alla più elevata

velocità di propagazione di cricca.

5. RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano i Sigg. E. Picco, D. Ranucci e G. Vimercati per l'esecuzione delle prove meccaniche e D. Valenti per le osservazioni delle superfici di frattura.

6. BIBLIOGRAFIA

- 1) Coyne J.E. and Coutts W.H. Jr. Atti del Convegno "High Temperature Alloys for Gas Turbines 1982". D. Reidel Publishing Company, pp. 839-852, 1982.
- 2) Coffin L.F. Jr. Fatigue at High Temperature, ASTM STP520, pp. 5-34, 1973.
- 3) Irving R.R. Iron Age, pp. 77-81, 1981.
- 4) Heiselstein H.L. United States Patent Office International Nickel Company, pp.62-79, 1962.
- 5) Coffin L.F. Jr. Metallurgical Transactions, Vol. 2, p. 3105, 1971.
- 6) Landgraf. L.W. ASTM STP 467, p. 3, 1970.
- 7) Coffin L.F. Jr. Journal of Materials, Vol. 6, p. 388, 1971.
- 8) Manson S.S. ASTM STP 520, p. 744, 1973.
- 9) Chaboche J.L. High Temperature Technology, Vol. 5 N° 2, pp. 59-72 1987.

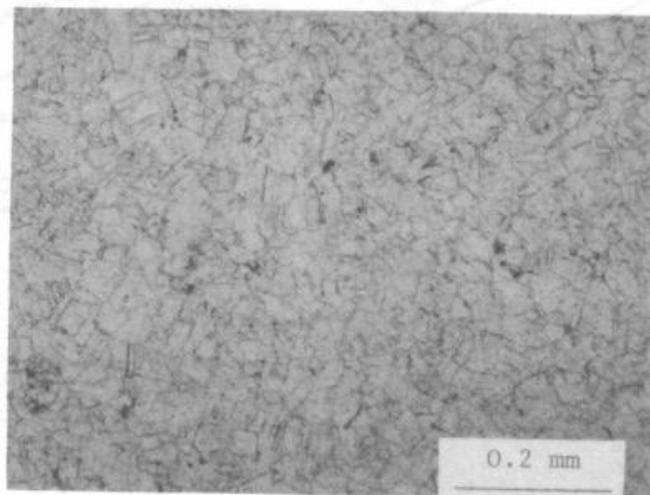
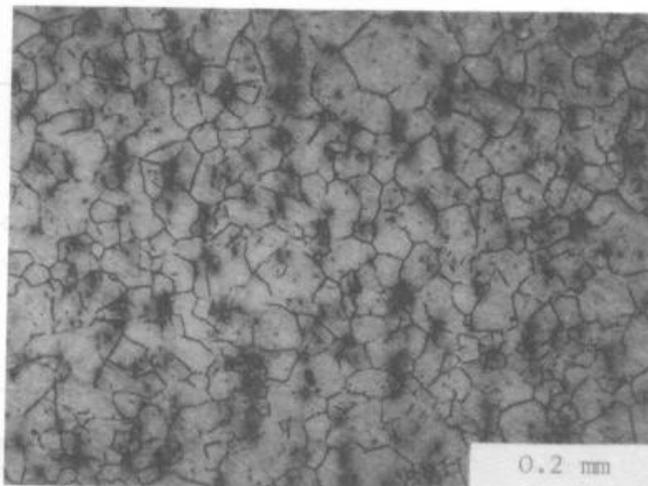
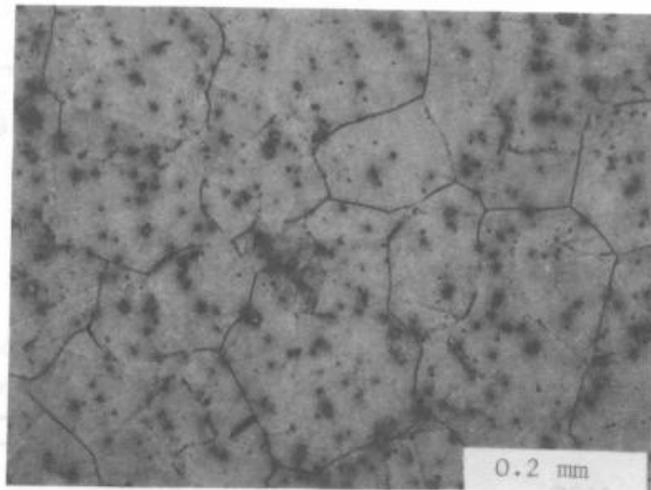


Fig. 1. Microstruttura della lega IN 718 nelle condizioni:
a) LGS, b) MGS, c) FGS

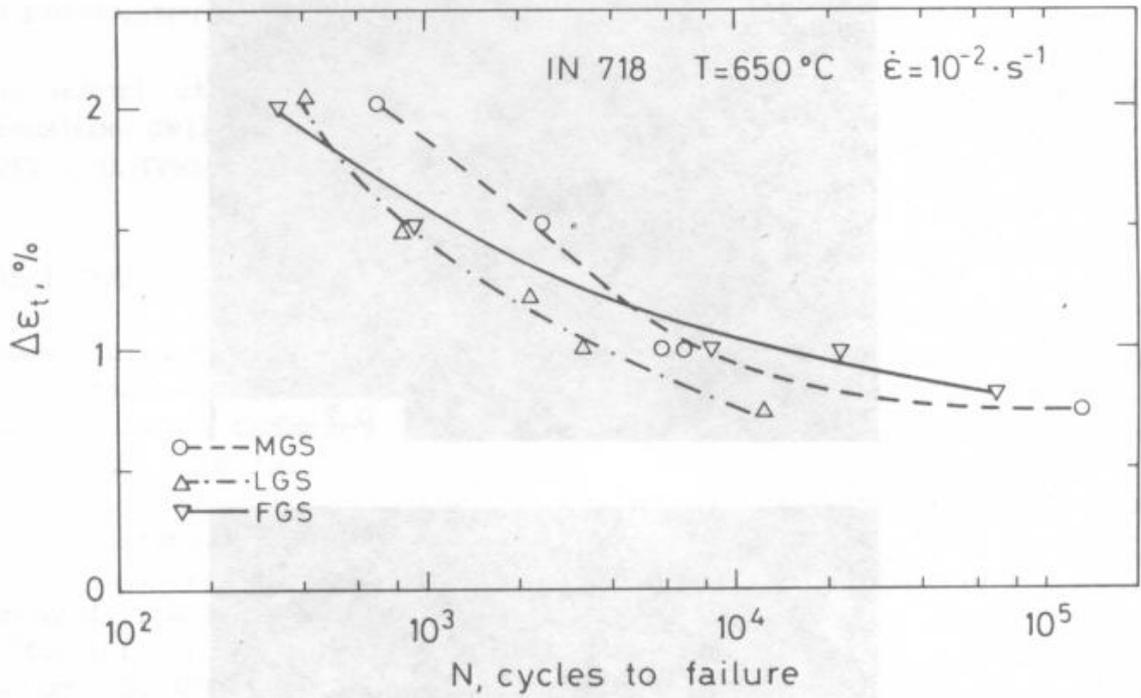


Fig. 2. Andamento delle curve di fatica oligociclica in funzione del trattamento termico.

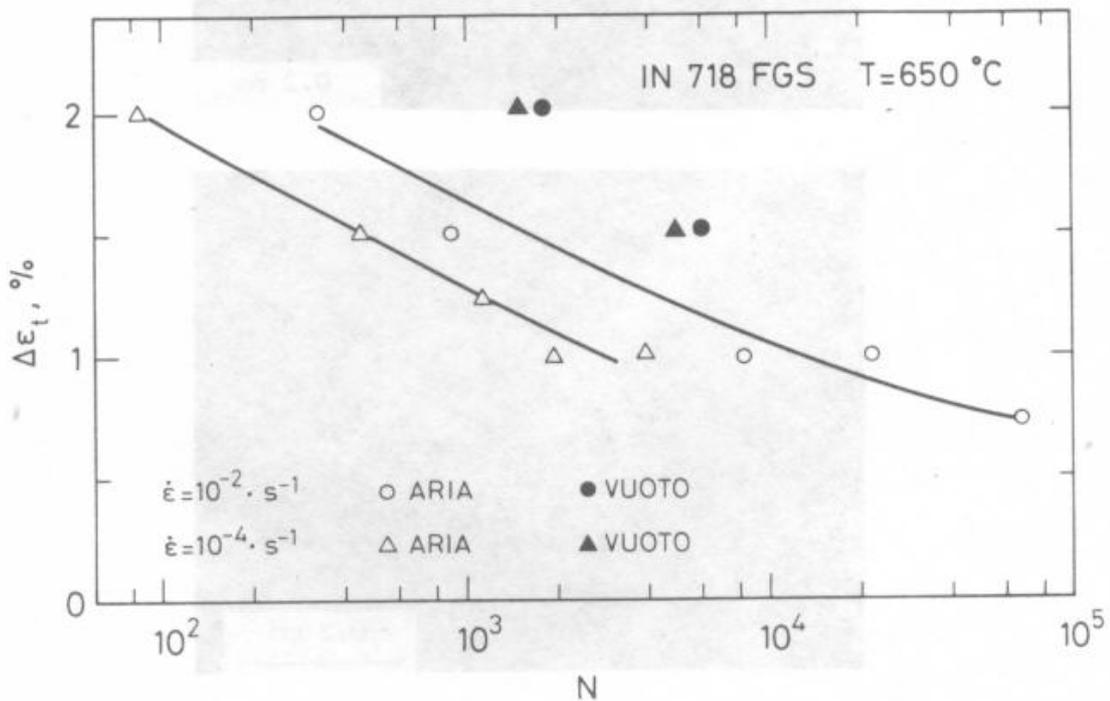


Fig. 3. Influenza della velocità di applicazione della deformazione e dell'ambiente sulla durata a fatica.

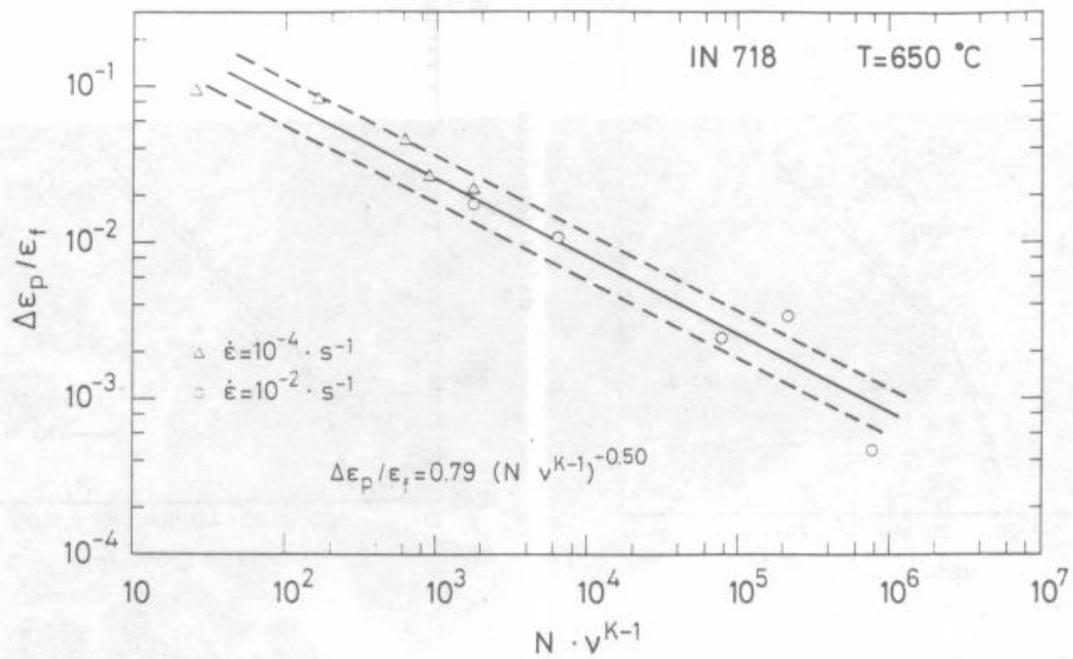
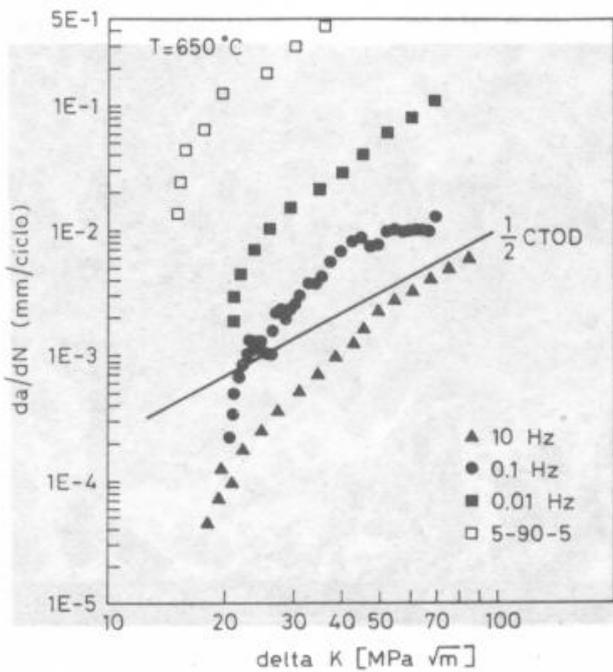
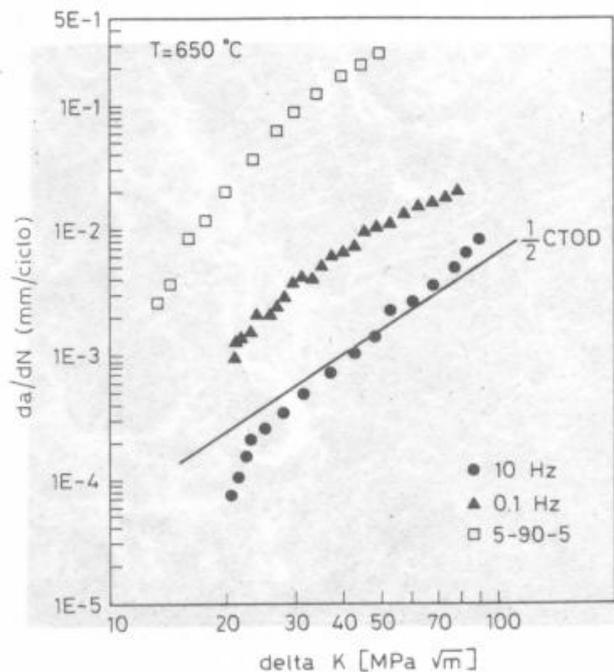


Fig. 4. Andamento della deformazione plastica in funzione del numero di cicli a rottura secondo l'equazione di Coffin - Manson modificata.

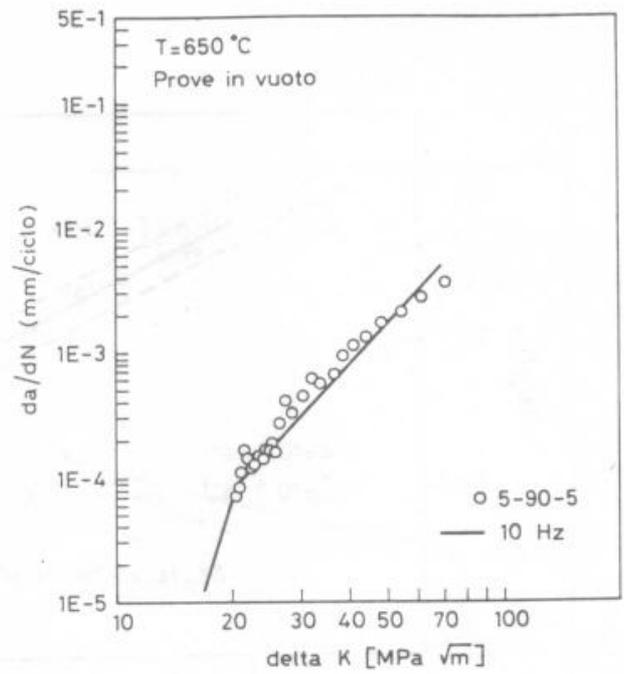
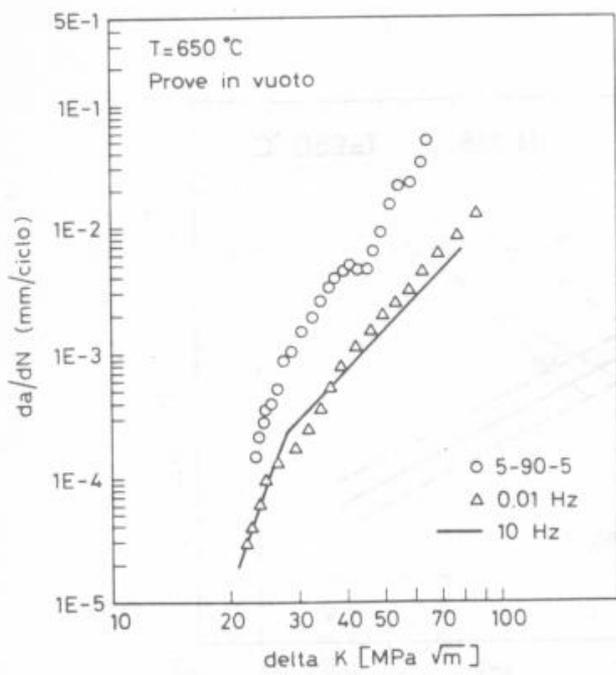


a)



b)

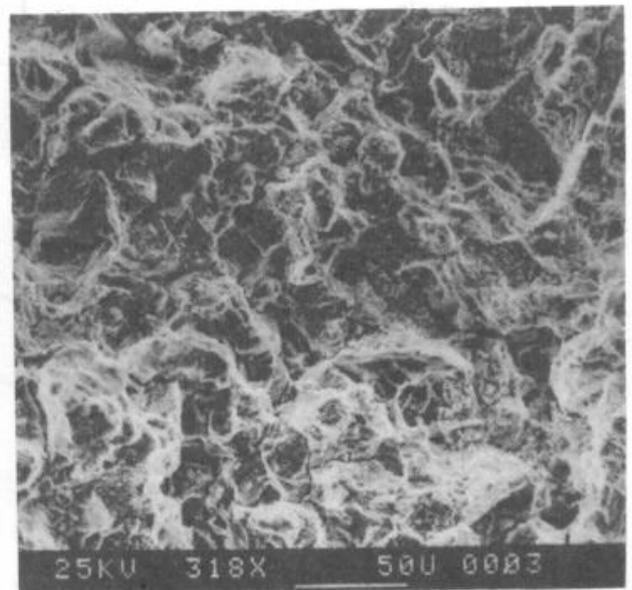
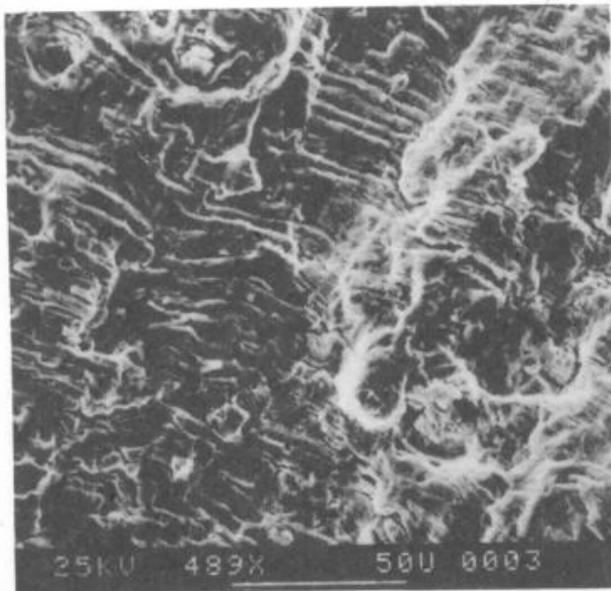
Fig. 5. Curve di propagazione di cricca in aria:
a) materiale LGS, b) materiale FGS.



a)

b)

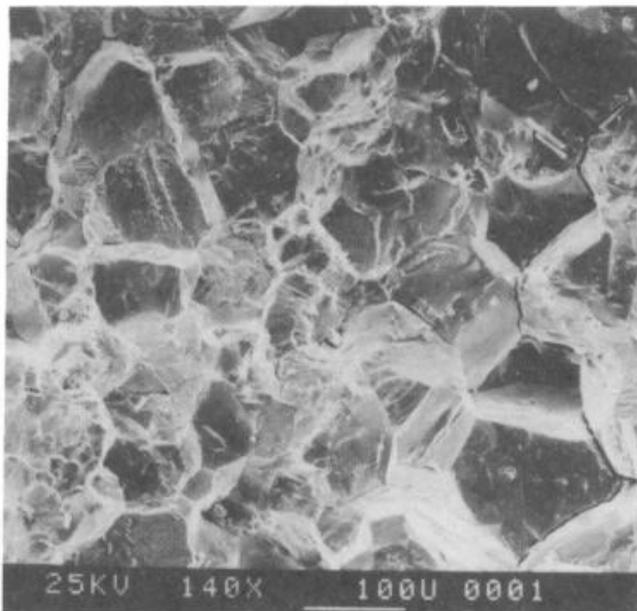
Fig. 6. Curve di propagazione di cricca in vuoto:
a) materiale LGS, b) materiale FGS.



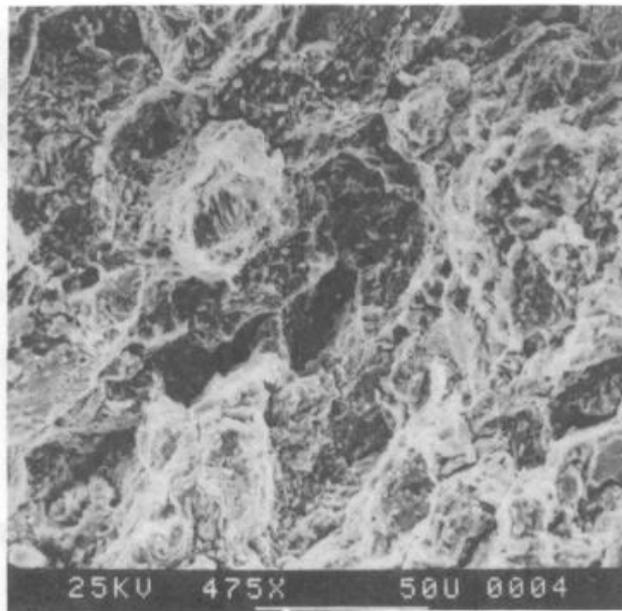
a)

b)

Fig. 7. Aspetto della superficie di frattura nel materiale FGS:
a) $\dot{\epsilon} = 10^{-2} s^{-1}$, $\Delta \epsilon_t = 1,51\%$, $N = 900$; b) $\dot{\epsilon} = 10^{-4} s^{-1}$,
 $\Delta \epsilon_t = 1,01\%$, $N = 3900$.



a)



b)

Fig. 8. Aspetto della superficie di frattura dopo prova di propagazione di cricca per fatica con "hold time": a) materiale LGS, b) materiale FGS.