

**INFLUENZA DELL'AMBIENTE SULLA PROPAGAZIONE DELLA CRICCA PER
FATICA AD ELEVATA TEMPERATURA IN SUPERLEGHE DI NICHEL**

G. Onofrio, V. Lupinc, G. Vimercati
CNR-ITM, Via Induno 10, Cinisello Balsamo

SOMMARIO

Si è studiato l'effetto dell'ambiente sulla propagazione di cricca per fatica nelle superleghe lavorate Inconel X-750 e Inconel 718, nelle microfuse IN 713 LC e IN 792+Hf, nella lega indurita per dispersione di ossidi Inconel MA 6000 e nella lega monocristallina CMSX-2.

Le misure effettuate a diverse temperature e frequenze del carico applicato hanno evidenziato una notevole influenza dell'ossidazione che, rispetto alle prove in vuoto, accelera la propagazione della cricca a medie temperature, mentre la rallenta a temperature più elevate.

INTRODUZIONE

La resistenza alla propagazione di cricca per fatica può essere drasticamente modificata da processi ossidativi e di creep all'apice della cricca stessa (1). Questi meccanismi dipendenti dal tempo assumono particolare importanza quando la frequenza di applicazione del carico venga diminuita o quando venga aggiunto, nel ciclo di fatica, un periodo di mantenimento del carico al valore massimo. Infatti alle più basse frequenze il fattore che controlla la rottura può diventare il tempo di prova piuttosto che il numero di cicli dando luogo a processi di creep e/o ad interazioni ambientali oltrechè alla fatica pura. Nelle superleghe più tradizionali, in grado di operare fino a temperature intermedie, tali interazioni portano inevitabilmente ad un aumento della velocità di propagazione rispetto a prove effettuate in vuoto, cioè in assenza di interazione ambientale (2). Nel presente lavoro, studiando anche materiali di formulazione più avanzata, fino a temperature di 950°C, si è osservata una inversione di tendenza del fenomeno nell'intervallo 750-850°C, infatti alle temperature più elevate appare una velocità di propagazione minore nelle prove in aria. Tale effetto è stato imputato a meccanismi di chiusura della cricca indotti dallo strato di ossido che si forma sulla superficie di frattura durante le prove ad elevata temperatura (3).

Scopo del presente lavoro è lo studio degli effetti della temperatura e della frequenza di prova sulla velocità di propagazione di cricche per fatica in diverse superleghe di nichel di interesse aeronautico.

MATERIALI E TECNICHE SPERIMENTALI

I materiali studiati sono:

- le leghe lavorate plasticamente a caldo Inconel X-750 e Inconel 718,
- le leghe prodotte per microfusione a cera persa IN 792+Hf e IN 713 LC,
- la lega ottenuta per alligazione meccanica Inconel MA 6000,
- la lega monocristallina CMSX-2.

Le composizioni chimiche delle leghe esaminate sono riportate in tabella 1.

TABELLA 1. Composizione chimica delle leghe studiate (%peso)

	Ni	Cr	Co	Mo	Fe	W	Ta	Nb	Al	Ti	Hf	C	Y ₂ O ₃
X-750	73	15	-	0,5	7	-	-	1	0,7	2,5	-	,04	-
718	53	18	,03	3	19	-	-	5,3	0,6	1	-	,03	-
713 LC	75	12	-	4,5	-	-	-	2	5,9	0,6	-	,05	-
792+Hf	61	12	9	1,9	-	3	3,9	-	3,1	4,5	1	,12	-
MA 6000	69	15	-	2	-	4	2	-	4,5	2,5	-	,05	1
CMSX-2	67	8	4,6	0,6	-	8	6	-	5,6	1	-	-	-

I provini impiegati sono del tipo SENT (single edge notch tension) con sezione rettangolare di 12 mm x 4,5 mm intagliati mediante elettroerosione per una profondità di 1mm.

Dopo precricatura a temperatura ambiente ed elevata frequenza, le prove di propagazione di cricca per fatica sono state effettuate sia in aria che in vuoto ($PO_2 < 10^{-3}$ Pa) in controllo di carico e forma d'onda triangolare, in un campo di frequenze variabile da 0,01 a 10 Hz ed a diverse temperature. I campioni in prova venivano riscaldati mediante forno a radiofrequenza con un controllo di temperatura di $\pm 3^\circ\text{C}$.

Per meglio evidenziare l'effetto dei meccanismi dipendenti dal tempo sulla velocità di propagazione di cricca per fatica, alcune prove sono state effettuate aggiungendo un periodo di mantenimento del carico al valore massimo all'onda triangolare.

La lunghezza della cricca è stata misurata con il meto-

do della caduta di potenziale in corrente continua. Le velocità di propagazione di cricca sono state calcolate in accordo con la norma ASTM e correlate alla variazione del fattore di intensità degli sforzi $\Delta K = K_{max} - K_{min}$.

RISULTATI SPERIMENTALI E DISCUSSIONE

Nelle Figg. 1a-f vengono riportate le velocità di propagazione di cricca per fatica in aria nelle superleghe esaminate. Per ogni materiale si è analizzato l'intervallo di temperatura di effettiva applicazione: fino a 650°C per le leghe lavorate; fino a 750°C per le leghe prodotte per microfusione e fino a 950°C per la lega ODS e la lega monocristallina.

Dall'analisi dei risultati si può osservare un aumento della velocità di propagazione della cricca all'aumentare della temperatura di prova fino a 750°C. Per temperature più elevate non si osservano effetti apprezzabili nel caso della lega ODS o addirittura si osserva una riduzione nella velocità di propagazione nel caso della lega monocristallina.

Considerando le leghe lavorate (Inconel X-750 e Inconel 718) l'aumento della velocità di propagazione di cricca con la temperatura può essere imputato all'aggressività dell'ambiente ad elevata temperatura: infatti le stesse curve ottenute in vuoto (Fig. 1a e 1b) mostrano una dipendenza trascurabile della velocità di propagazione dalla temperatura nell'intervallo 25 - 650°C.

Nel caso delle leghe microfuse (IN 713 LC e IN 792+ Hf) l'ossidazione non è sufficiente a spiegare l'aumento della velocità di propagazione con la temperatura, come è possibile constatare confrontando le curve in aria ed in vuoto riportate nelle Figg. 1c e 1d; all'ossidazione è da associare una possibile riduzione della resistenza meccanica di tali leghe all'aumentare della temperatura (4).

A più elevata temperatura (> 750°C) da considerarsi per la lega ODS e la lega monocristallina (Fig. 1e e 1f) meccanismi di chiusura da ossido o di arrotondamento dell'apice della cricca tendono a compensare la riduzione delle proprietà meccaniche portando ad effetti trascurabili nel caso della lega MA 6000 o addirittura ad una diminuzione della velocità di propagazione al crescere della temperatura nel caso della lega CMSX-2 (Fig. 1f).

E' inoltre da tenere in conto che le superleghe di nichel monocristalline sono caratterizzate da una notevole anisotropia delle proprietà meccaniche che vengono a dipendere dalla orientazione cristallina (5). In Fig. 2 è mostrato come, a 950°C, le velocità di propagazione di cricca per fatica siano influenzate dalla orientazione secondaria, cioè dalla direzione di avanzamento della cricca nel piano (001).

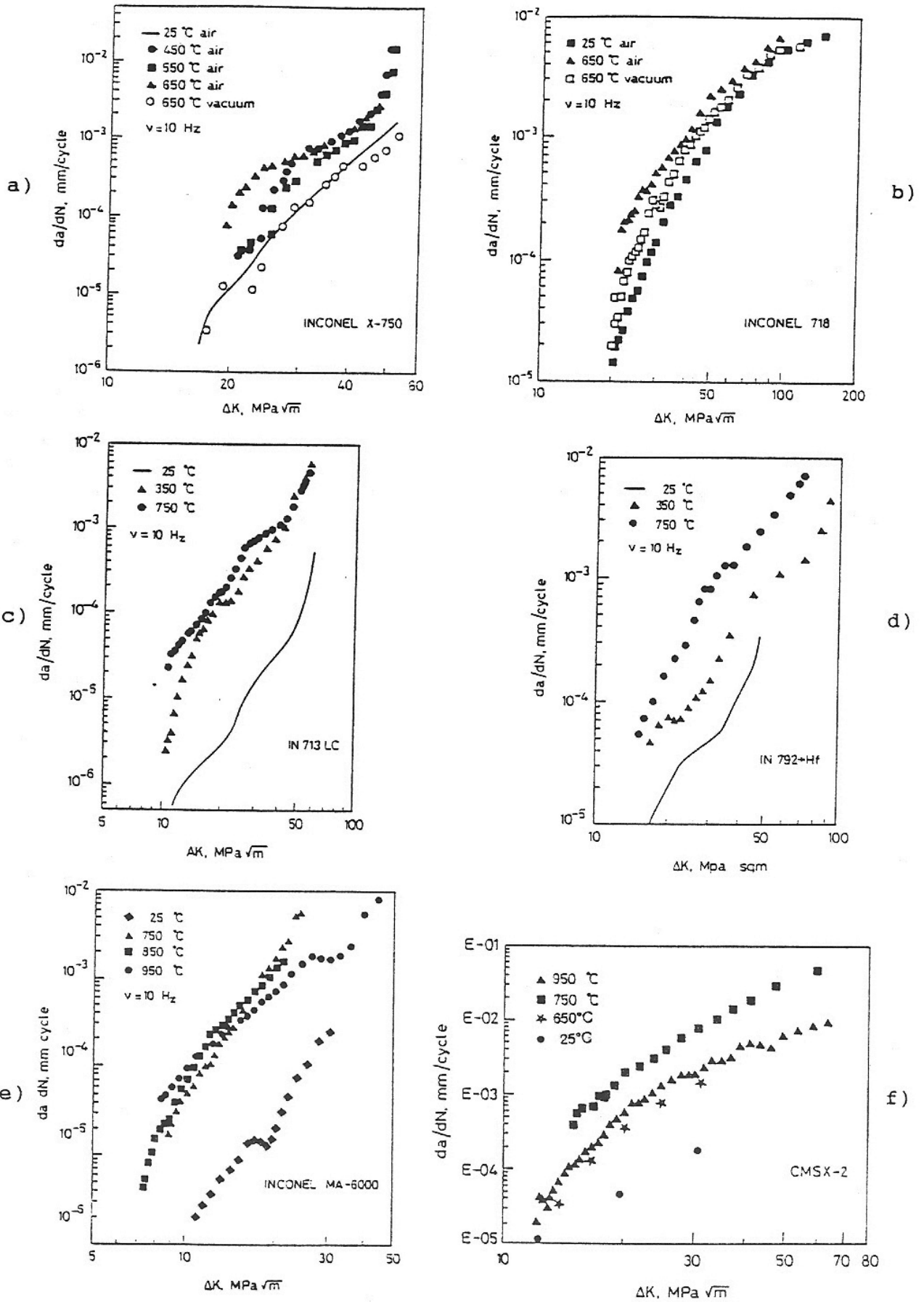


Fig.1 Effetto della temperatura sulla velocità di propagazione di cricca per fatica nelle superleghe esaminate.

I valori minimi di velocità di propagazione sono nella direzione $\langle 110 \rangle$ mentre la direzione $\langle 100 \rangle$ appare la meno resistente all'avanzamento della cricca. Coerentemente con questo comportamento la direzione $\langle 210 \rangle$ mostra valori intermedi di velocità di propagazione.

Nelle Figg. 3 e 4 è mostrato l'effetto della frequenza di prova in aria e in vuoto, alla temperatura di 650°C sulla velocità di propagazione della cricca nelle leghe Inconel X-750 e Inconel 718.

Per entrambi i materiali la velocità di propagazione aumenta al diminuire della frequenza ma con meccanismi diversi. Nel caso dell'Inconel X-750 l'aumento di velocità si manifesta anche nelle prove in vuoto (Fig.3) indicando che, in questo materiale, sono operativi processi di creep all'apice della cricca. Per l'Inconel 718 invece non si riscontra un effetto della frequenza nelle prove in vuoto nell'intervallo 0,01 - 10 Hz (Fig. 4b) indicando che l'aumento della velocità di propagazione misurato nelle prove in aria è da attribuire principalmente a processi di ossidazione.

Particolarmente danneggiante appare, nell'Inconel 718, la forma d'onda ottenuta aggiungendo un periodo di mantenimento del carico massimo di 90 s all'onda triangolare di 0,1 Hz (Fig. 4a) la quale dà pure luogo ad un sensibile aumento di velocità di propagazione in vuoto (Fig. 4b) indicando che, in queste condizioni sperimentali particolarmente severe, intervengono anche processi di creep.

Nelle Figg. 5 è riportato l'effetto della frequenza di prova, in aria ed in vuoto, alla temperatura di 750°C sulla velocità di propagazione di cricca per fatica nelle superleghe prodotte per microfusione IN 792+Hf e IN 713 LC. Tale velocità aumenta al diminuire della frequenza di prova, anche se per questi materiali l'aumento è meno rilevante rispetto alle leghe lavorate. L'IN 713 LC appare meno sensibile agli effetti dell'ossidazione: a 10 Hz e bassi valori di ΔK non si osserva alcuna differenza tra dati in aria ed in vuoto, mentre al crescere del ΔK la curva in vuoto è più bassa di quella in aria. Il confronto delle velocità di propagazione di queste due superleghe ottenute in vuoto indica che gli effetti del creep sono più marcati nell'IN 792+Hf che nell'IN 713 LC, risultato confermato dalle prove di propagazione di cricca per creep riportate in Fig. 6.

In Fig. 7 viene riportato l'effetto della frequenza di prova, in aria ed in vuoto, alla temperatura di 850°C sulla velocità di propagazione della cricca per fatica della superlega ODS Inconel MA 6000.

I risultati sperimentali mostrano che la velocità di propagazione è più elevata in vuoto. Risultati simili sono stati già riportati in letteratura (6) per la lega microfusa IN 738 LC alla temperatura di 850°C ed attribuiti ad un fenomeno di biforcazione della cricca nelle prove in aria (Fig. 8). Nel presente lavoro, ad alta frequenza, non si è

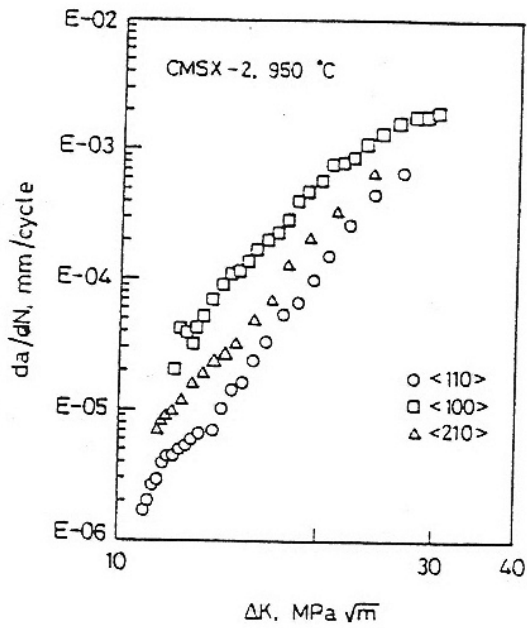


Fig.2 Influenza della direzione secondaria sulla propagazione di cricca nella lega CMSX-2.

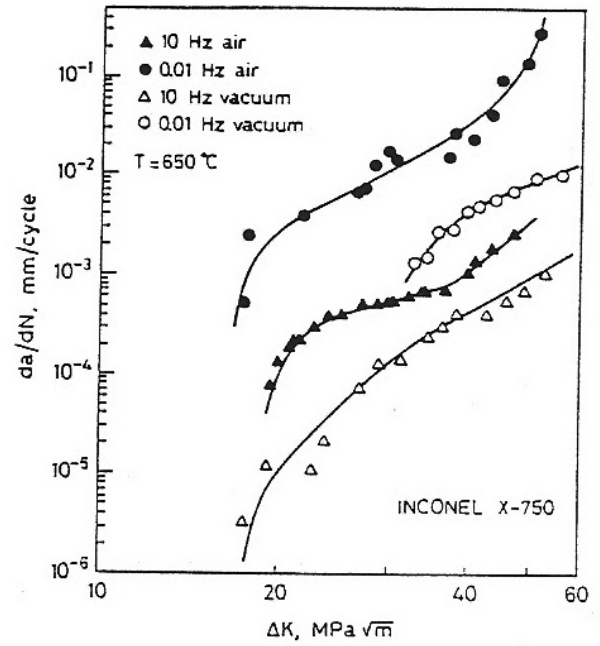
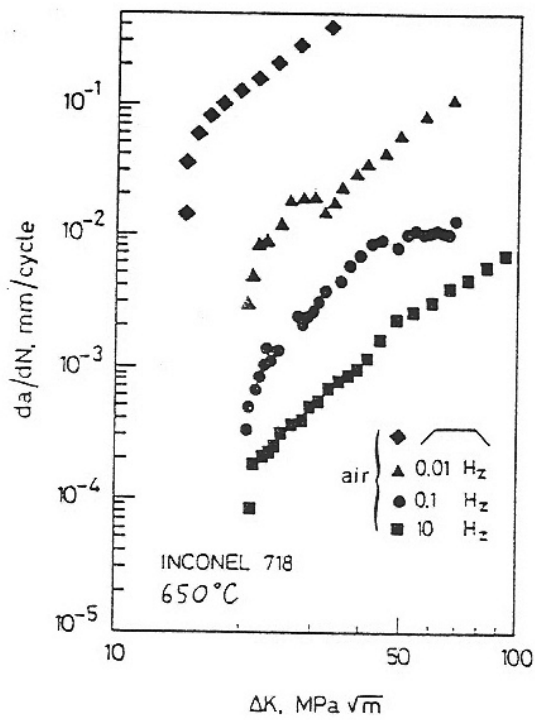
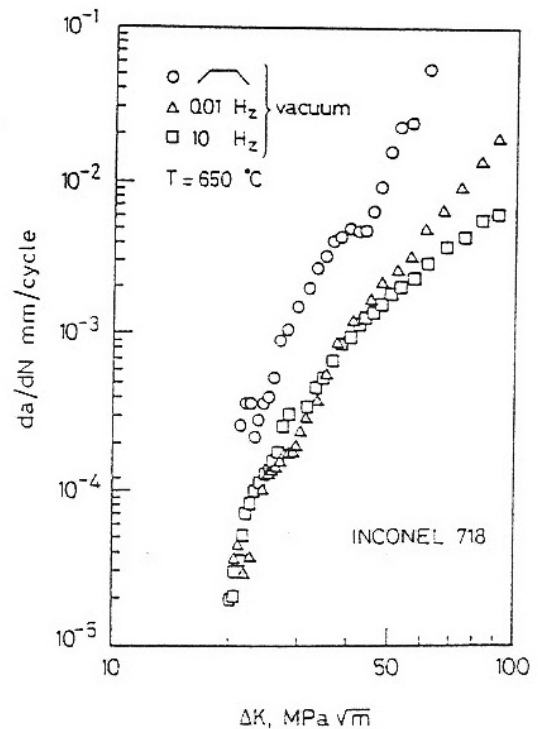


Fig.3 Influenza dei fenomeni dipendenti dal tempo sulla propagazione di cricca nella lega X-750.

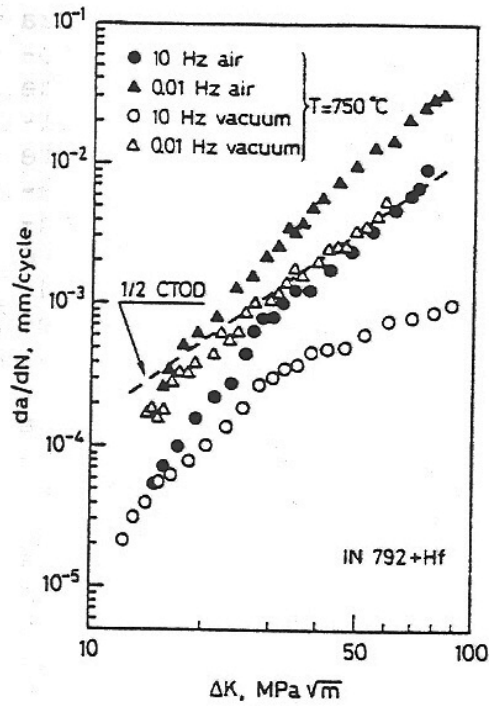


a)

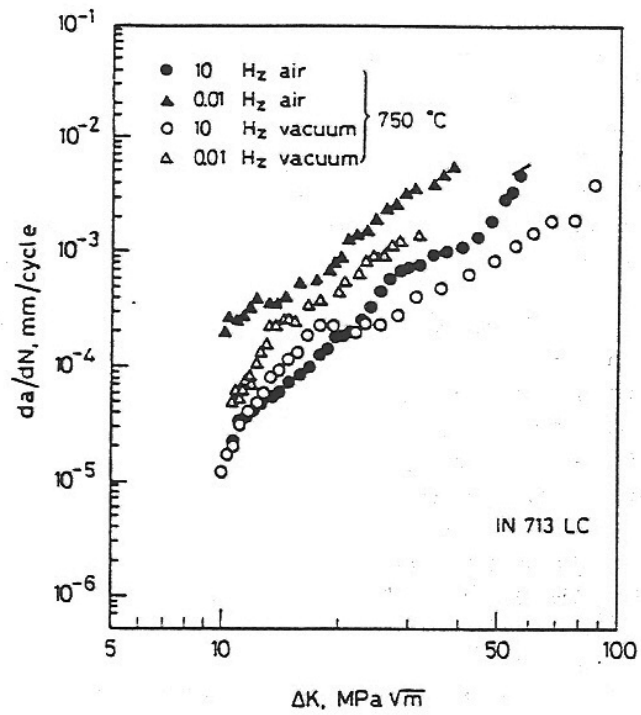


b)

Fig.4 Influenza dei fenomeni dipendenti dal tempo sulla propagazione di cricca nella lega Inconel 718; a) prove in aria, b) prove in vuoto.



a)



b)

Fig.5 Influenza dei fenomeni dipendenti dal tempo sulla propagazione di cricca nelle superleghe microfuse; a) 792 + Hf e b) 713 LC.

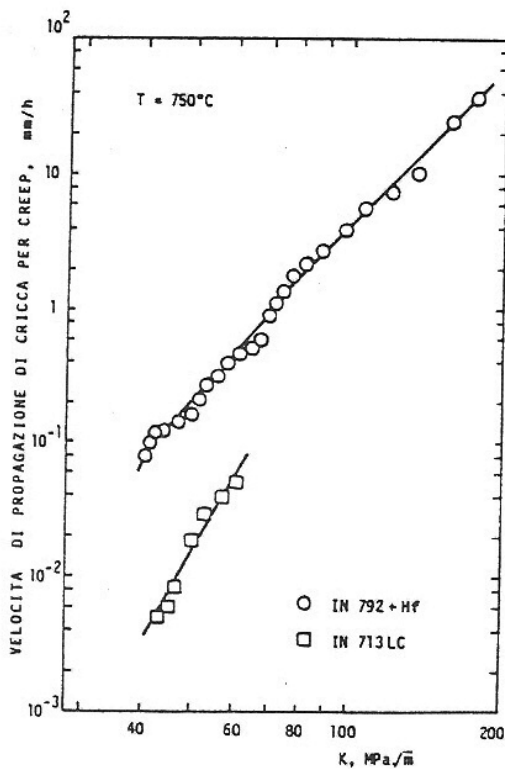


Fig.6 Confronto fra le velocità di propagazione per creep nelle leghe microfuse.

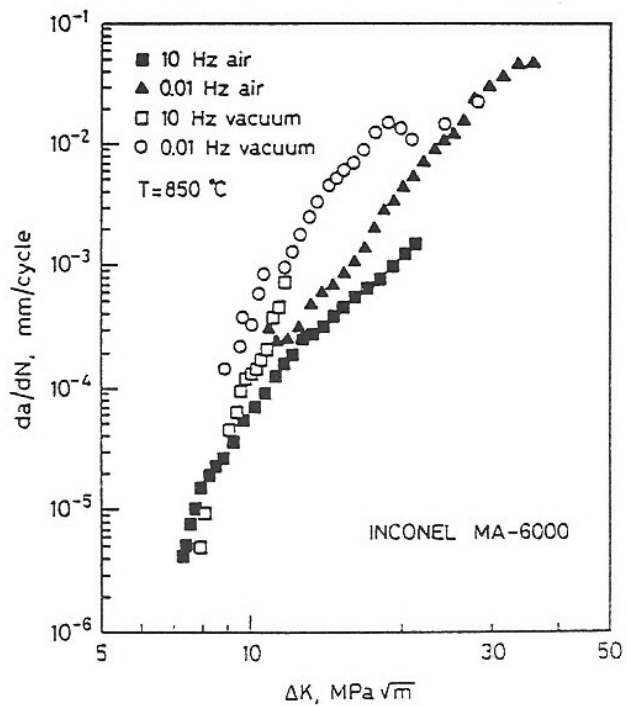


Fig.7 Influenza dei fenomeni dipendenti dal tempo sulla propagazione di cricca nel MA 6000.

osservato tale fenomeno mentre a bassi valori di frequenza la biforcazione della cricca si è manifestata sia nelle prove in aria che in quelle in vuoto portando a ritenere che tale meccanismo non sia responsabile del comportamento sperimentale osservato. Si è invece notato, nelle prove condotte in vuoto a 0,01 Hz, una variazione ciclica del valore di caduta di potenziale in corrispondenza alle variazioni del carico applicato. Questo effetto non è riscontrabile nelle prove in aria dove viene invece ipotizzato un effetto di chiusura della cricca da ossido che porta ad una diminuzione del ΔK effettivo.

In Fig. 9 sono riportati i risultati relativi a prove in aria ed in vuoto con forma d'onda triangolare o trapezoidale della superlega monocristallina CMSX-2.

L'ambiente causa una marcata diminuzione della velocità di propagazione di cricca per fatica, in particolare quando viene aggiunto un mantenimento del carico massimo all'onda triangolare. Questi risultati possono essere interpretati considerando le interazioni creep-fatica-ambiente:

-la curva in vuoto ottenuta a 4 Hz rappresenta la componente di fatica pura ed è molto vicina alla previsione ottenuta con il modello del CTOD riportata dalla linea tratteggiata;

-la curva in aria ottenuta a 4 Hz mostra una velocità di propagazione che è più di un ordine di grandezza inferiore ai più bassi valori di ΔK . Questa differenza in velocità di propagazione si riduce progressivamente al crescere del ΔK e le due curve convergono ai più elevati valori di ΔK coerentemente con un processo di chiusura indotto da ossido;

-la curva in vuoto ottenuta con onda trapezoidale non mostra effetti di creep a bassi valori di ΔK , ma al crescere del ΔK questa curva e quella ottenuta con forma d'onda triangolare divergono in modo continuo. Questa differenza rappresenta il contributo del creep o dell'interazione creep-fatica alla velocità di propagazione di cricca;

-la curva in aria ottenuta con forma d'onda trapezoidale mostra velocità di propagazione ancora più basse di quelle ottenute con onda triangolare in tutto il campo di ΔK esaminato, indicando che nel primo caso:

la chiusura da ossido è ancora più efficace e/o

un arrotondamento dell'apice della cricca ha luogo quando si ha il mantenimento del carico, prevalendo sul creep e/o sull'interazione creep-fatica.

In Fig. 10 è mostrato l'effetto di un continuo cambiamento di condizioni sperimentali fra aria e vuoto sulla velocità di propagazione di cricca per fatica in prove con

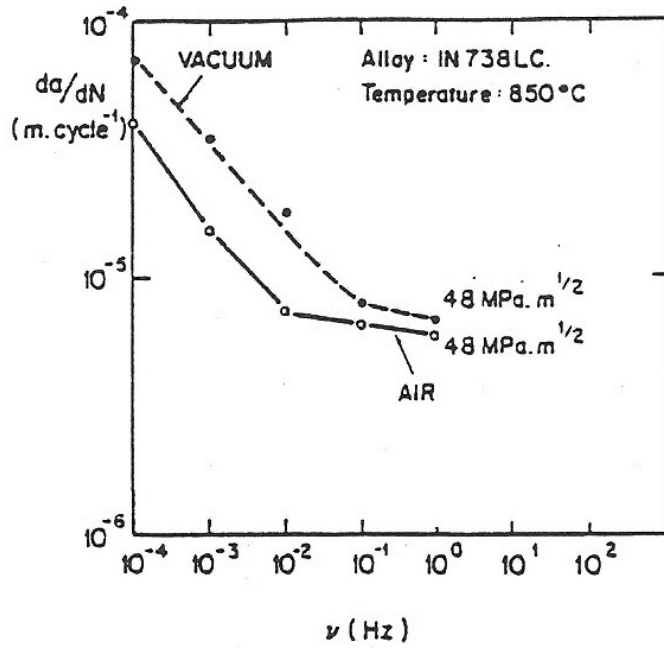


Fig. 8 Influenza della frequenza sulla propagazione di cricca per fatica della superlega IN 738 LC. (6)

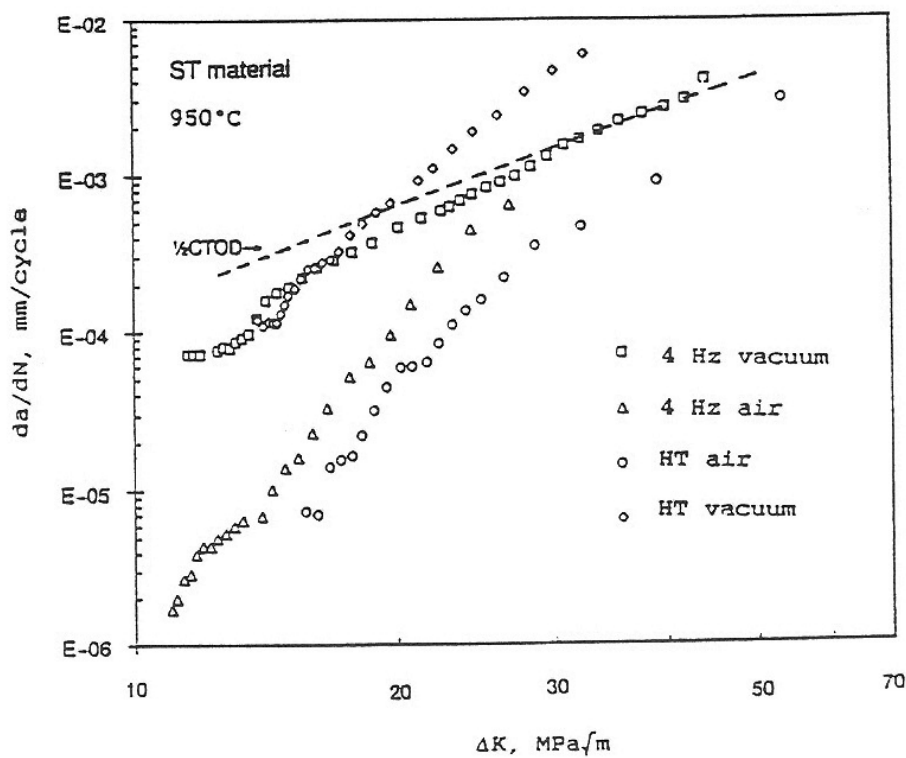


Fig.9 Influenza dei fenomeni dipendenti dal tempo sulla propagazione di cricca nella superlega monocristallina CMSX-2.

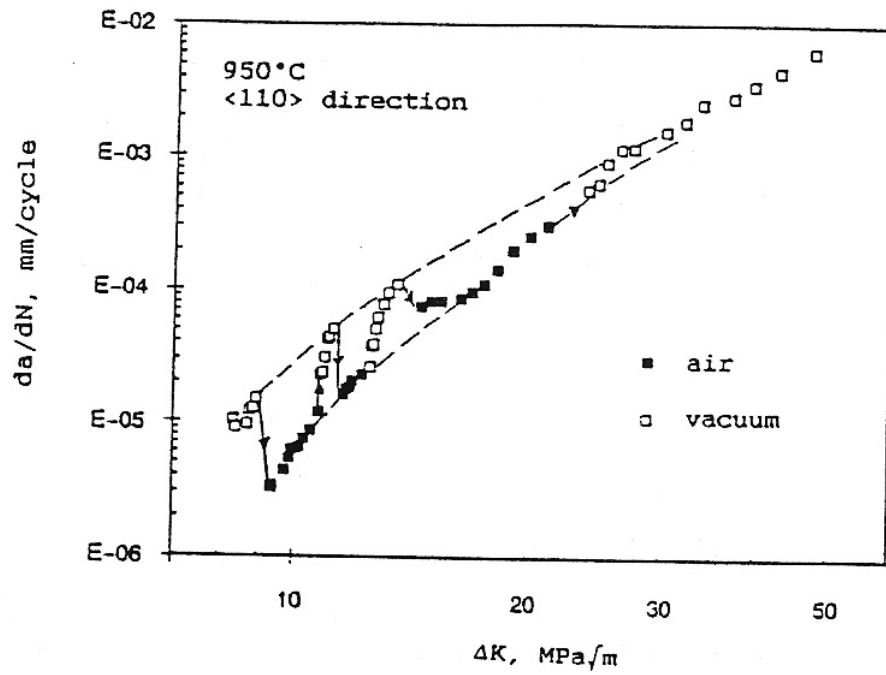


Fig. 10 Influenza di ripetuti cambiamenti dell'ambiente di prova tra aria e vuoto sulla propagazione di cricca nella superlega CMSX-2.

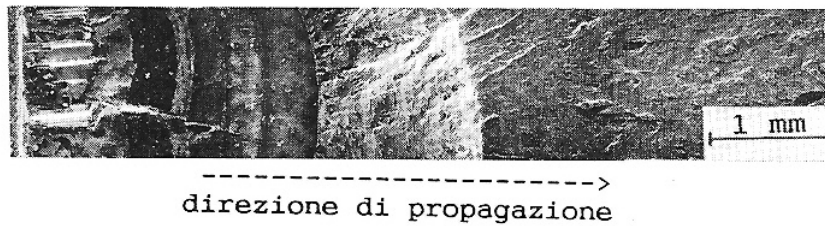


Fig. 11 Superficie di frattura della lega monocristallina CMSX-2 dopo la prova illustrata in Fig. 9. Aree scure: propagazione in aria, aree chiare: propagazione in vuoto.

forma d'onda trapezoidale, alla temperatura di 950°C. Viene confermata la più elevata velocità di propagazione in vuoto.

La superficie di frattura del campione sottoposto a questa prova è mostrata in Fig. 11; le aree più scure (ossidate) corrispondono alla propagazione della cricca in aria.

CONCLUSIONI

Dall'insieme dei risultati sperimentali si possono trarre le seguenti principali conclusioni:

1) La velocità di propagazione di cricca per fatica in aria di leghe lavorate, microfuse e ODS aumenta quando la frequenza di prova diminuisce. Comportamento opposto è stato mostrato dalla lega CMSX-2 a 950°C.

2) Considerando gli effetti dell'ossidazione: nelle leghe lavorate le velocità di propagazione in vuoto sono notevolmente più basse che in aria alla temperatura di 650°C. A 750°C le leghe microfuse mostrano una minore sensibilità all'ossidazione, ma la propagazione in aria resta più veloce che in vuoto.

Aumentando la temperatura fino a 850°C nella lega MA 6000 e fino a 950°C nella lega CMSX-2 l'avanzamento della cricca in vuoto diventa più veloce che in aria: l'effetto dell'ossidazione è di diminuire la velocità di propagazione sia attraverso un meccanismo di chiusura indotto dall'ossido a bassi valori di ΔK che, eventualmente, attraverso un arrotondamento dell'apice della cricca.

3) Per gli ultimi due casi in particolare è interessante notare che le velocità di propagazione di difetti interni ad un componente rappresentate dalle prove in vuoto, sono maggiori di quelle in aria.

BIBLIOGRAFIA

- 1) F.Gabrielli, M.Marchionni, G.Onofrio, Proc. of the 7th Int. Conf. on Fracture (ICF7), Houston TX, K.Salama ed. Pergamon Press, (1989), pp. 1149-1163.
- 2) G.Onofrio, G.Vimercati, D.Valenti, Atti del XVII AIAS, (1989), Università di Ancona, pp.203-212.
- 3) V.Lupinc, G.Onofrio, G.Vimercati, Proc. of Superalloys 1992, Seven Springs PA, S.D. Antolovich et Al ed., (1992), pp.717-726.
- 4) F.Gabrielli, R.M. Pelloux, Metall.Trans., Vol.13A, (1981). p. 1083.
- 5) S.H.Ai, V.Lupinc, G.Onofrio, Scripta Met. in corso di pubblicazione.
- 6) R.B. Scarlin, "Fracture 1977", Taplin ed., University of Waterloo Press, Waterloo, Vol.2, (1977), p. 849.