

SENSIBILITÀ ALL'INTAGLIO - PROVE MECCANICHE IN INCONEL 718

M. Giannozzi¹, E. Giorni¹, S. Naldini¹, F. Pratesi², G. Zonfrillo²

¹ Nuovo Pignone S.p.A., Firenze

² Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali, Università di Firenze

Sommario

Sono stati analizzati i risultati di dieci anni di prove di collaudo condotte su campioni della superlega Inconel 718, utilizzata per dischi di turbine a gas. In particolare lo studio ha riguardato ricerche di correlazione fra sensibilità all'intaglio e i risultati di varie prove meccaniche. Le indagini di tipo metallografico e frattografico parallelamente condotte hanno portato ulteriori indizi e permesso valutazioni su vari parametri derivabili dalle prove meccaniche. Una conferma sperimentale è stata ottenuta su tre nuove serie di campioni sottoposti ad appositi trattamenti termici per ottenere specifiche microstrutture.

Abstract

Results of ten years tests performed on samples of Inconel 718, used for disks of gas turbines have been analysed. The study has in particular dealt with the research of correlation between results of mechanical tests and notch rupture sensitivity. At the same time, metallographic and fractographic investigations have been performed, giving further indications and allowing various parameters deduced from mechanical tests to be critically evaluated. An experimental confirmation has been obtained on three series of samples submitted to suitable heat treatments in order to obtain specific microstructures.

1. Introduzione

La presente ricerca riguarda la sensibilità all'intaglio della superlega Inconel 718 impiegata comunemente per la produzione di dischi di turbine a gas. Un disco in esercizio è sottoposto a creep e a cicli lenti di fatica durante le fasi di avviamento e di arresto della macchina che, in presenza di un materiale sensibile all'intaglio, possono portare alla formazione ed alla propagazione veloce di cricche, specialmente nella zona di calettamento delle pale.

Un componente particolarmente sollecitato, se realizzato con un materiale sensibile all'intaglio, costituisce quindi un serio pericolo per l'integrità della macchina [1]. Per evitare tale pericolo è necessaria la scelta di un adatto materiale metallico opportunamente trattato termicamente.

L'Inconel 718 è una superlega a base nichel, con concentrazione di ferro e cromo prossima al 20% e numerosi elementi aggiunti in minori quantità, grazie alla sua stabilità e alle sue

buone caratteristiche meccaniche, mantenute sia ad alta temperatura sia a temperature inferiori allo zero, trova impiego in un vasto campo di applicazioni.

La matrice dell'Inconel 718, come quella di tutte le superleghe a base nichel è costituita da una struttura cubica a facce centrate indicata con γ . L'indurimento per precipitazione è conferito dalla fase γ' e soprattutto γ'' , entrambe coerenti con la matrice. La situazione microstrutturale è comunque piuttosto complessa per la presenza di altre fasi con possibile influenza positiva o negativa sulla resistenza come le fasi δ , η , di Laves e i carburi MC e M_6C [2].

Il trattamento termico dell'Inconel 718 viene scelto in base all'applicazione; nel caso dei dischi di turbina ottenuti per forgiatura prevede la solubilizzazione a 980°C per 2 ore, seguita da raffreddamento e da un invecchiamento costituito da: un primo mantenimento a 720 °C per 8 ore seguito da un raffreddamento a 55°C/ora fino a 620°C, quindi il materiale è mantenuto a questa temperatura per 8 ore e infine raffreddato in aria o olio fino a temperatura ambiente.

2. Dati provenienti dalle prove meccaniche di collaudo

Analisi dei dati e ricerca correlazioni.

Per effettuare il collaudo del materiale del disco vengono condotte, secondo le normative ASTM, prove di:

- trazione a temperatura ambiente,
- trazione a 650°C,
- durezza a temperatura ambiente,
- stress-rupture a 650°C su provini misti con tensione 690 MPa.

I provini misti presentano sia un tratto con intaglio che un tratto liscio di uguale diametro, in modo da poter osservare il comportamento con e senza intaglio nelle medesime condizioni e valutare quindi la capacità del materiale di deformarsi localmente nella zona intagliata, ridistribuendo le tensioni più elevate dovute alla presenza dell'intaglio stesso. Un materiale sensibile all'effetto di concentrazione delle tensioni si frattura con basse deformazioni plastiche in corrispondenza dell'intaglio, mentre nel caso di materiale con comportamento duttile la rottura avviene nel tratto liscio con allungamenti elevati.

La normativa AMS [3] richiede un allungamento minimo nella prova di stress-rupture del 4%. Se i valori risultanti dalle prove sono inferiori alle soglie stabilite o la rottura del provino avviene nella zona dell'intaglio vengono effettuate due ulteriori prove di stress-rupture: se una di queste non dà risultati buoni il materiale viene scartato.

I risultati che si ottengono dalle prove di stress-rupture sono però affetti da dispersione; in particolare si sono presentati dei casi in cui ripetendo la prova si sono avute sia rotture sull'intaglio sia nel tratto cilindrico con alti allungamenti.

L'esperienza accumulata nel corso degli anni dalla Nuovo Pignone S.p.A. indica che questo requisito non è sufficientemente cautelativo per evitare problemi di fragilità e quindi è stata introdotta una normativa interna per garantire il comportamento del materiale in esercizio, prescrivendo un valore minimo del 15%. Il materiale selezionato con tale caratteristica non ha più presentato questi problemi nelle applicazioni.

Per approfondire queste problematiche sono stati analizzati i risultati delle prove meccaniche di collaudo dei dischi prodotti dalla Nuovo Pignone nel corso di circa dieci anni, allo scopo di ricercare eventuali correlazioni fra le caratteristiche meccaniche e la sensibilità all'intaglio, in modo da fornire delle basi scientifiche alle specifiche richieste o determinarne altre più funzionali.

I dati esaminati sono riferiti a circa 250 campioni, di cui circa 85% derivano da dischi di turbina e gli altri da barre e componenti vari. Per le prove di trazione sono stati presi in considerazione il carico di rottura e di snervamento e l'allungamento percentuale a rottura, per le prove di stress-rupture la durata e l'allungamento percentuale a rottura. A volte, per un solo campione sono state condotte più prove di stress-rupture; in questo caso sono stati analizzati solo i risultati ottenuti dalla prima prova.

Occorre notare, inoltre, che la stragrande maggioranza delle prove sono state condotte su materiale che ha presentato elevati allungamenti a stress-rupture, mentre solo in pochi casi (circa il 5%) si sono avute rotture sull'intaglio.

Rappresentando tali variabili in termini di distribuzione normale si ottengono i valori di media e di deviazione standard riportati in Tabella 1. Come si può vedere la dispersione per alcune grandezze è notevole, anche perché i risultati si riferiscono a forgiati forniti in un lungo periodo di tempo.

Tabella 1 - Analisi statistica dei risultati delle prove di collaudo

	Media	Deviazione
Durezza HB	418	13,24
Tensione di rottura 20°C (MPa)	1424	47,44
Tensione di snervamento 20°C (MPa)	1166	67,88
Allungamento % 20°C	19	3,50
Tensione di rottura 650°C (MPa)	1148	41,24
Tensione di snervamento 650°C (MPa)	975	47,90
Allungamento % 650°C	24	5,16

Le varie grandezze sopra menzionate sono state riportate l'una in funzione dell'altra ottenendo diversi grafici. Raramente però questi sono indicativi di possibili correlazioni: nella maggior parte dei casi si ottiene una nuvola di punti dalla quale non è possibile estrarre un andamento preferenziale, né distinguere differenze di comportamento tra i campioni che hanno manifestato sensibilità all'intaglio e i rimanenti. Nel seguito saranno descritti i più rappresentativi.

Per tenere conto della sensibilità all'intaglio, i campioni sono stati divisi in tre classi (rappresentate con simboli diversi) in funzione dell'allungamento ottenuto nella prova di stress-rupture (Asr).

In Fig. 1 la tensione di rottura a 650°C è riportata in funzione del corrispondente valore ottenuto a temperatura ambiente, ricavando un andamento qualitativamente lineare con pendenza di circa 45°. Inoltre si può notare che tutti i campioni rotti sull'intaglio e la maggior parte di quelli con $Asr < 15\%$ presentano valori più bassi, in particolare a 20°C. Questo è meglio evidenziato dalle distribuzioni delle sollecitazioni a rottura a temperatura ambiente per le due classi di campioni (Tabella 1).

Il grafico più indicativo fra tutti quelli realizzati è risultato essere quello che riporta l'allungamento a rottura a 650°C in funzione dell'allungamento a temperatura ambiente, Figura 2. Non si nota una correlazione marcata tra i due parametri; osservando però la disposizione delle tre classi in cui sono stati divisi i campioni, si rileva che la maggior parte di quelli con bassa duttilità a stress-rupture si trovano al di sotto della retta a 45°, cioè

presentano valori del rapporto A650/A20 minori di uno. Tale rapporto può quindi essere considerato un parametro significativo per la sensibilità all'intaglio.

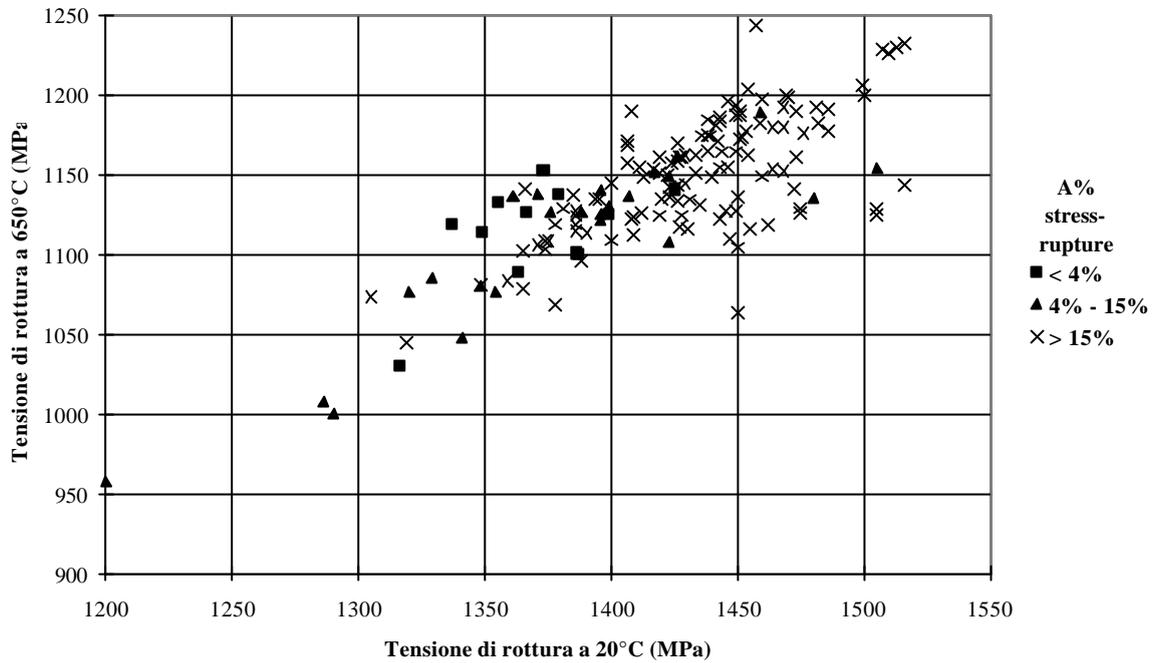


Figura 1 - Tensione di rottura a 20°C e a 650°C.

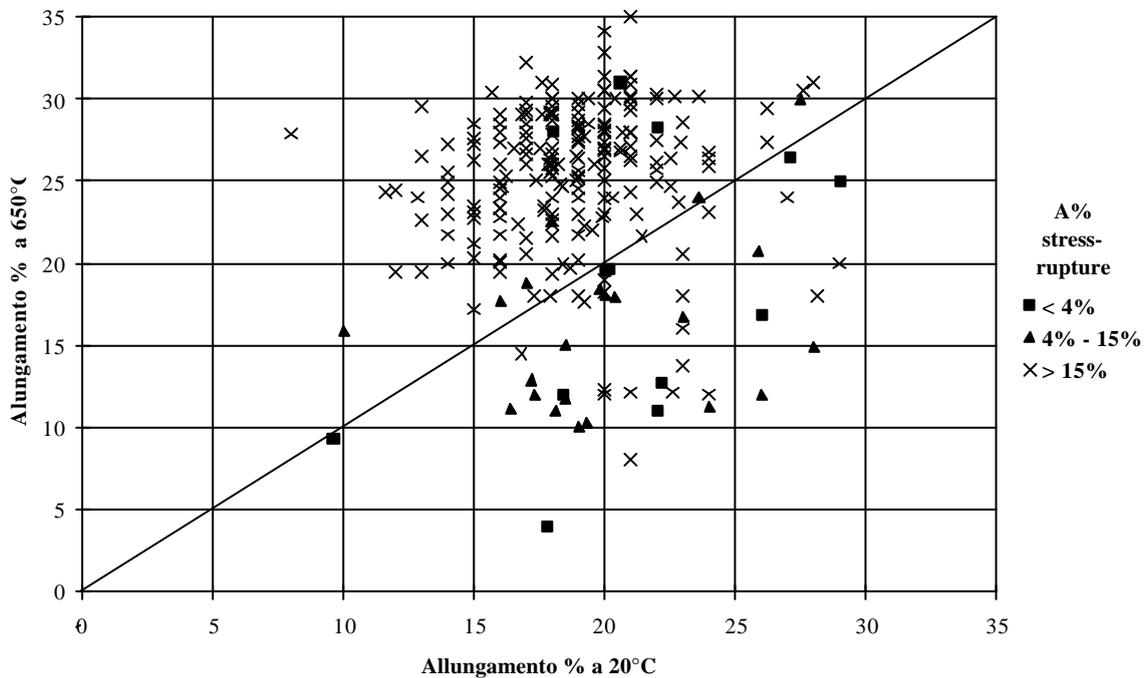


Figura 2 – Allungamento percentuale a 20°C e a 650°C.

Tuttavia si hanno anche alcuni casi di rottura sull'intaglio o di bassi allungamenti caratterizzati da un valore maggiore di uno e altre in cui il rapporto è basso mentre

l'allungamento a stress-rupture alto. Si può perciò affermare che il rapporto tra gli allungamenti non è un parametro che permette di individuare con sicurezza un materiale sensibile all'intaglio; resta comunque un parametro indicativo, specialmente se utilizzato insieme con altre indagini.

Inoltre sui campioni di materiale che nella prova di stress-rupture hanno presentato allungamenti minori del 15% sono state condotte due ulteriori prove. Anche le analisi su dati relativi a tali prove ripetute non hanno portato a risultati conclusivi, in quanto in tutti i casi nell'insieme delle tre prove non si è mai avuta più di una rottura sull'intaglio e solo in un caso i tre valori dell'allungamento sono tutti inferiori al 15%.

Oltre al rapporto A649/A20 sono state esaminate altre variabili, ottenute combinando alcuni parametri delle prove meccaniche, senza però trovare nessun indice maggiormente significativo.

Indagine metallografica e aspetti microstrutturali

Nell'individuazione della sensibilità all'intaglio nell'Inconel 718 è risultato di fondamentale importanza l'esame frattografico. Innanzitutto è stato possibile constatare che tutti i provini che si rompono sull'intaglio non presentano traccia di deformazione plastica e la superficie di frattura è completamente intergranulare.

Esaminando le superfici di frattura di alcuni provini che hanno sempre presentato comportamento duttile a stress-rupture, è stato constatato che le superfici di frattura sono, in questo caso, completamente transgranulari senza traccia di zone intergranulari. In presenza di fratture transgranulari ripetute si può concludere di non essere in presenza di materiale sensibile all'intaglio.

In alcuni casi ad alto allungamento a stress-rupture si è associata l'osservazione di presenza di zone intergranulari sulla superficie di rottura. Effettuando ulteriori prove meccaniche tali materiali hanno manifestato a volte comportamento fragile. Pertanto l'esame delle superfici di frattura permette di individuare la sensibilità all'intaglio in campioni che, da una sola prova di stress-rupture, sembrerebbero non risentire di questo effetto.

Sono state effettuate anche alcune osservazioni sulle fasi presenti ed è stata osservata in particolare una notevole variabilità a seconda dei casi nella quantità e morfologia della fase δ che come riportato in letteratura [4, 5] ha influenza sulla sensibilità all'intaglio.

3. Nuovi campioni da trattamenti termici prefissati

Per approfondire il problema, sono state effettuate prove meccaniche su campioni appositamente preparati con microstrutture diverse.

Trattamenti termici sperimentali e loro effetto sulla microstruttura.

Il materiale sul quale sono stati condotti i trattamenti termici, con lo scopo di modulare la percentuale della fase δ , è stato ricavato tagliando in parti un disco di turbina esercito per un tempo limitato. Dal disco sono stati ricavati tre campioni, di cui uno, indicato con materiale A, è stato lasciato "allo stato", non è stato cioè trattato termicamente. Gli altri due (materiale B e C) hanno subito specifici trattamenti termici. Poiché il disco è stato in esercizio, è da notare che il campione "allo stato", come pure gli altri due, ha subito il trattamento termico standard che viene fatto su tutti i dischi dopo la forgiatura (Tabella 2).

Come si vede, l'unica differenza fra il trattamento termico eseguito sul materiale B e C è che la solubilizzazione a 980°C per 2 ore per il materiale C non è stata eseguita. Tutti e tre i trattamenti prevedono l'invecchiamento in 2 stadi a 720°C e 620°C. Il raffreddamento da

980°C e 720°C e successivamente da 720°C a 620°C viene eseguito in forno con velocità di raffreddamento di 55°C/h.

Tabella 2 - trattamenti termici eseguiti sui tre campioni.

Materiale	Trattamento termico
A	Trattamento standard (980°C 2h raffr. olio + 720°C 8h , 620°C 8h raffr. aria)
B	1040°C 2h raffr. olio + 980°C 2h, 720°C 8h, 620°C 8h raffr. aria
C	1040°C 2h raffr. olio + 720°C 8h, 620°C 8h raffr. aria

Nel caso dei materiali B e C è stato eseguito un mantenimento a 1040°C, ben oltre la temperatura di solubilizzazione della fase δ , per cancellare la struttura precedentemente formata e per far solubilizzare completamente la fase δ nella matrice; inoltre a questa temperatura e per tempi brevi non si ha un eccessivo ingrossamento del grano.

Nel materiale B dopo la solubilizzazione è stato eseguito uno stadio di 2 ore a 980°C che provoca la precipitazione di fase δ . La permanenza in temperatura è stata breve e quindi la fase δ è precipitata solo in piccola quantità. L'invecchiamento è stato quello standard in due stadi così da non avere ulteriore precipitazione della fase δ .

Infine, sul materiale C non è stato condotto il riscaldamento a 980°C in modo tale da non far precipitare la fase δ .

Analisi dei risultati delle prove meccaniche.

Per valutare le caratteristiche meccaniche del materiale, da ognuno dei tre campioni con diverse percentuali di fase δ precipitata, sono stati ricavati:

- 1 campione per la prova di durezza e l'osservazione metallografica
- 1 provino per la prova di trazione a temperatura ambiente,
- 1 provino per la prova di trazione a 650°C,
- 4 provini per la prova di stress-rupture.

I risultati ottenuti dalle prove meccaniche eseguite sui provini, ricavati dai tre materiali, sono riportati nelle Tab. 3 e 4. È da notare che nel caso del materiale A le prove di stress-rupture riportate sono solo tre perché una non è risultata valida. Ogni provino è identificato da un numero e una lettera che indica il materiale dal quale proviene. In fondo alla tabella 3 è riportato anche il rapporto fra l'allungamento nella prova di trazione a 650°C e l'allungamento nella prova di trazione a temperatura ambiente, già introdotto. Ognuna delle tre durezza riportate è la media ricavata dai valori di tre prove fatte sullo stesso materiale.

Esaminando i risultati si nota subito come passando dal materiale A al C si ha una diminuzione di resistenza. Infatti diminuiscono durezza, tensioni di rottura e snervamento sia nella prova di trazione a caldo che in quella a temperatura ambiente. La resistenza del materiale C e del materiale B è simile anche se il C è leggermente meno resistente.

Considerando sempre le prove di trazione, si nota che l'allungamento, e quindi la duttilità, aumenta nel passare dal materiale A ai materiali B e C. Per quanto riguarda il rapporto fra l'allungamento a 650°C e quello a temperatura ambiente, per tutti i materiali è risultato maggiore di uno anche se questo parametro è minore per i materiali B e C.

La maggiore resistenza del materiale A rispetto a quella dei materiali B e C può essere giustificata, dal punto di vista metallurgico, dal diverso contenuto di fase δ che si ha nei materiali B e C. La mancanza di fase δ sul bordo grano, o una sua leggera presenza in forma di aghi o film sottile, rende debole il bordo stesso facilitando gli scorrimenti. Questa ipotesi è avvalorata anche dal fatto che i materiali B e C hanno mostrato maggiore duttilità nella prova di trazione e risulta in accordo con quanto riportato da altri autori [6].

Per quanto riguarda le prove di trazione c'è quindi una netta differenza fra il comportamento del materiale A e dei due materiali B e C.

Tabella 3 – Risultati delle prova di durezza e trazione.

Materiale	Durezza HB	Trazione 20°C			Trazione 650°C			Rapporto A%650 A%20
		Rottura MPa	Snervam. MPa	Allung. %	Rottura MPa	Snervam. MPa	Allung. %	
A	420	1488	1264	16,4	1191	1020	28,0	1,71
B	390	1302	1088	25,6	1039	989	30,0	1,17
C	385	1289	1055	28,0	1024	849	35,6	1,24

Tabella 4 – Risultati delle prove di stress-rupture.

Prova	1A	2A	3A	1B	2B	3B	4B	1C	2C	3C	4C
Allungamento %	22,7	30,2	29,6	0	0	26,9	13,3	17,3	33,2	34,8	0
Strizione %	60,8	61,4	60	0	0	31,7	13,2	30,2	54	46,2	0
Durata ore	118	95	84	1,3	1	236	117	189	308	220	7

I risultati delle prove di stress-rupture, invece, non identificano immediatamente il comportamento del materiale nelle diverse condizioni di trattamento termico. Per quanto riguarda il materiale A non si sono avute rotture sull'intaglio e i valori di allungamento e strizione ottenuti sono tutti alti così come erano stati rilevati in fase di collaudo. Il materiale con cui è stato fatto il disco non sembra quindi essere sensibile all'intaglio. Nel caso dei campioni B e C si sono avute rotture sull'intaglio (identificabili dall'allungamento nullo) in alcune prove mentre nelle altre si sono avuti allungamenti molto alti. Se si considera il materiale C, ad esempio, si sono ottenuti due allungamenti superiori al 30%, mentre nell'ultima prova si è avuta una rottura sull'intaglio.

Anche il materiale B ha avuto un comportamento molto diverso fra una prova e l'altra. Si sono presentate, infatti, due rotture sull'intaglio nelle prime due prove mentre nelle altre due si sono ottenuti allungamenti abbastanza alti. Dal comportamento mostrato nella prova di stress-rupture, si deduce che i campioni B e C, pur avendo avuto in alcune prove allungamenti molto alti, presentano dei problemi di sensibilità all'intaglio.

Il comportamento nelle prove di stress-rupture è più omogeneo nel caso del materiale A in cui non si hanno grandi variazioni di allungamento, rispetto ai materiali B e C. Un fattore che può contribuire alla maggiore dispersione degli allungamenti a stress-rupture nei campioni B e C, sono le maggiori dimensioni del grano a seguito del trattamento a 1040°C. In presenza di grani più grandi si hanno, infatti, maggiori disomogeneità locali e differenze fra provini diversi, compresa la zona dell'intaglio.

Per quanto riguarda le durate, i tempi maggiori si sono ottenuti nel caso del campione C mentre quello A, pur avendo presentato allungamenti alti in tutte le prove, ha dato durate più basse. Ciò è collegabile ancora alla dimensione del grano.

L'esame frattografico conferma la presenza di aree di frattura intergranulare sui provini B e C anche quando hanno un allungamento elevato.

4. Conclusioni

Dall'esame dei risultati delle prove meccaniche condotte nell'arco di dieci anni è emerso, innanzitutto, che nel caso dell'Inconel 718 si hanno valori molto dispersi di tutti i parametri. Questa dispersione è imputabile, in parte, al processo di forgiatura che influisce in modo

notevole sulle caratteristiche meccaniche e che è stato modificato nel corso degli anni. La dispersione dipende poi anche dalla complessa natura del materiale. Nel caso delle prove di stress-rupture, ad esempio, è stato visto che più prove eseguite sullo stesso campione possono dare risultati molto diversi.

In seguito ai numerosi approcci usati nell'elaborazione dei risultati delle prove meccaniche, non sembra che si possano ottenere dei parametri, utilizzando i tre tipi di prova presi in considerazione, che identifichino con sicurezza se il materiale è o non è sensibile all'intaglio.

L'allungamento a stress-rupture può rivelare meglio di altre grandezze l'eventuale comportamento fragile, ma non è un parametro che può essere utilizzato con assoluta sicurezza, in quanto l'elevato allungamento ottenuto in una prova non assicura l'assenza della sensibilità all'intaglio. Infatti, eseguendo più prove di stress-rupture sullo stesso campione, si sono talvolta ottenuti per alcuni provini degli allungamenti molto alti, anche superiori al 30%, mentre per altri delle rotture sull'intaglio.

Analizzando i risultati delle prove meccaniche dal punto di vista statistico, è stato notato come la maggior parte dei provini che hanno dato allungamenti bassi o rotture sull'intaglio nella prova di stress-rupture presenta un valore del rapporto fra l'allungamento nella prova di trazione a 650°C e in quella a temperatura ambiente minore di un valore soglia di poco superiore a uno.

È stato anche notato come la tensione di rottura a 20°C sia mediamente inferiore nei provini che hanno dato allungamenti bassi a stress-rupture. Altri parametri misurati con le prove meccaniche hanno mostrato peggiori correlazioni con la sensibilità all'intaglio.

Sono stati allora condotti specifici trattamenti termici su dei campioni di Inconel 718 prelevati da un disco di turbina per ottenere microstrutture diverse, in particolare per quanto riguarda la fase δ .

Le prove meccaniche eseguite su questi tre campioni confermano quanto detto sulla difficoltà di individuare con certezza la sensibilità all'intaglio nell'Inconel 718 attraverso le sole prove meccaniche di collaudo. Tuttavia, l'aver fissato al 15% l'allungamento minimo a rottura ha permesso di eliminare sistematicamente gli inconvenienti prima verificati.

L'esame frattografico del provino di stress-rupture è in grado di fornire indicazioni utili sull'attitudine del materiale ad avere rotture sull'intaglio.

Infine l'affidabilità dei dischi turbina fabbricati in Inconel 718 per turbine a gas industriali deve essere ricercata sia attraverso le prove sopra descritte, ma soprattutto nella definizione di un ciclo di fabbricazione adatto e ripetibile.

Bibliografia

- [1] Metals Handbook 9th edition, "Mechanical Testing", vol.8, ASM, **1985**.
- [2] Sims C.T., Hagel W.C. "The Superalloys", Wiles, New York, **1972**.
- [3] Aerospace Materials Specification AMS – 5662E.
- [4] Sjoberg G., Ingesten N.G. "Grain Boundary δ -Phase Morphologies, Carbides and Notch Rupture Sensitivity of Cast Alloy 718", in: Superalloys 718, 625 and Various Derivatives. Loria A. et al., The Minerals, Metals and Materials Society, **1991**.
- [5] Srinivas S., Satyanarayana D.V.V., Gopikrishna D., Pandey M.C. "Investigation on notch embrittlement of a Ni-base superalloy", Scripta Metallurgica et Materialia, **32**, 1145-1148, **1995**.
- [6] Brooks J.W., Bridges P.J. "Metallurgical Stability of Inconel Alloy 718", in: Superalloys 1988, The Metallurgical Society, **1988**.