

## COMPORTAMENTO MECCANICO DI SUPERLEGHE DI NICKEL IN PRESENZA DI INTAGLIO

V. Crupi<sup>a</sup>, E. Guglielmino<sup>a</sup>, M. Labanti<sup>b</sup>, S. Merenda<sup>c</sup>

<sup>a</sup>DCIIM, Università di Messina, Contrada di Dio – 98166 Sant'Agata (ME), e-mail: [vcrupi@ingegneria.unime.it](mailto:vcrupi@ingegneria.unime.it), [eguiglie@ingegneria.unime.it](mailto:eguiglie@ingegneria.unime.it)

<sup>b</sup>ENEA, CRF, Via Ravegnana, 186 - 48018 Faenza (RA), e-mail: [m.labanti@faenza.enea.it](mailto:m.labanti@faenza.enea.it)

<sup>c</sup>Pininfarina S.P.A., Via Nazionale, 30 - 10020 Cambiano (TO), e-mail: [s.merenda@pininfarina.it](mailto:s.merenda@pininfarina.it)

### SOMMARIO

La scelta del materiale più idoneo per un'applicazione strutturale come i componenti di una turbina dipende da diverse proprietà meccaniche ed in particolare dalla tenacità ad elevate temperature. L'obiettivo di questo lavoro scientifico è stato quello di valutare la tenacità di alcune superleghe di Nickel (Inconel 617, Nimonic 263) a differenti temperature (22, 350, 550 °C) ed il loro comportamento a fatica in presenza di intaglio.

### ABSTRACT

The choice of the best material for a structural application as the turbine components depends on different mechanical properties, in particular by the toughness at high temperatures. The aim of this scientific work was to assess the toughness of different Nickel super alloys (Inconel 617, Nimonic 263) at different temperatures (22, 350, 550 °C) and the fatigue behaviour of notched specimens.

### 1. INTRODUZIONE

Nel 1967 Rice [1] propose un nuovo parametro della Meccanica della Frattura Elasto-Plastica: il  $J$  *integral*, che è in grado di definire il campo tensionale elastoplastico in prossimità di una cricca. Dal 1967 ad oggi sono presenti in letteratura numerosi articoli scientifici relativi alla sua valutazione teorica, sperimentale e numerica. Il  $J$  *integral* è stato calcolato anche per via analitica nel caso di intagli con raggio di fondo non nullo [2] ed è stato correlato all'incremento termico rilevato sulla superficie di campioni con intaglio a V in AISI304 [3]. Il problema è non solo quello di definire il  $J$  *integral* di un pezzo intagliato, ma in particolare il suo valore critico ( $J$  critico) per il quale si ha la propagazione instabile del difetto.

Il  $J$  critico è un parametro della Meccanica della Frattura che consente di definire la tenacità a frattura dei materiali. L'obiettivo di questo lavoro scientifico è stato quello di analizzare il comportamento meccanico di alcune superleghe di nickel in presenza di intaglio in termini di tenacità a frattura anche ad alte temperature e di limite di fatica. Le prove di tenacità a frattura a temperatura ambiente e ad alta temperatura su superleghe di nickel sono state svolte nell'ambito di un progetto europeo del programma "Thermie", riguardante la scelta e caratterizzazione di materiali per impianti innovativi per la produzione di energia. Le superleghe di nickel garantiscono, infatti, un ottimo compromesso tra proprietà meccaniche ad alte e basse temperature, resistenza a fatica meccanica e termica, resistenza all'ossidazione ed alla corrosione. Il loro impiego ha consentito, negli ultimi anni, un

significativo incremento delle prestazioni in svariati settori: nucleare, termoelettrico, aerospaziale e navale. Le superleghe di nickel presentano una eccellente resistenza alla corrosione anche in un ambiente corrosivo come quello marino e perciò trovano applicazione in campo navale per la realizzazione di elementi di collegamento (viti, dadi, bulloni), grazie anche alla loro resistenza all'infragilimento da idrogeno. Il loro impiego principe è nella realizzazione dei componenti delle turbine a gas, le quali, largamente utilizzate nei motori degli aerei, sono presenti attualmente anche in ambito navale sul naviglio militare (incrociatori e fregate) e su veicoli marini ad alta velocità (aliscafi, unità di pattugliamento, traghetti Ro-Ro di ultima generazione).

L'effetto di intaglio sulla resistenza a fatica delle superleghe di Nickel è stato determinato applicando una metodologia innovativa: il "Metodo Termografico". Il "Metodo Termografico" [5], sviluppato dal Prof. Ing. A. Risitano, è stato applicato con successo in passato per determinare il limite di fatica di provini o componenti meccanici [5, 6], di giunti saldati [7, 8], per trovare una relazione tra l'incremento termico in un provino metallico, soggetto a carichi ciclici, ed il suo smorzamento specifico [9] e per valutare l'effetto termoplastico [10].

## 2. MATERIALI E METODI

### 2.1 Geometria e proprietà meccaniche dei provini

Sono state condotte prove sperimentali di trazione per il calcolo del J critico su campioni di differenti superleghe di Nickel (Inconel 617, Nimonic 263) ed a differenti temperature (22, 350, 550 °C):

- 3 prove a 22° C su Inconel 617 fuso ed invecchiato,
- 3 prove a 22° C su Nimonic 263 forgiato ed invecchiato,
- 3 prove a 350° C su Inconel 617 forgiato ed invecchiato,
- 3 prove a 550° C su Inconel 617 forgiato ed invecchiato.

Il provino utilizzato nelle prove è quello CT di tipo francese (Fig. 1) con larghezza "W" di 50 mm, spessore "B" di 25 mm e con un intaglio di lunghezza di 28 mm ed angolo di apertura di 60°. Le scanalature laterali sul provino hanno una duplice funzione: promuovono la propagazione della cricca lungo il piano iniziale di giacenza e contribuiscono alla formazione di uno stato di triassialità esterna.

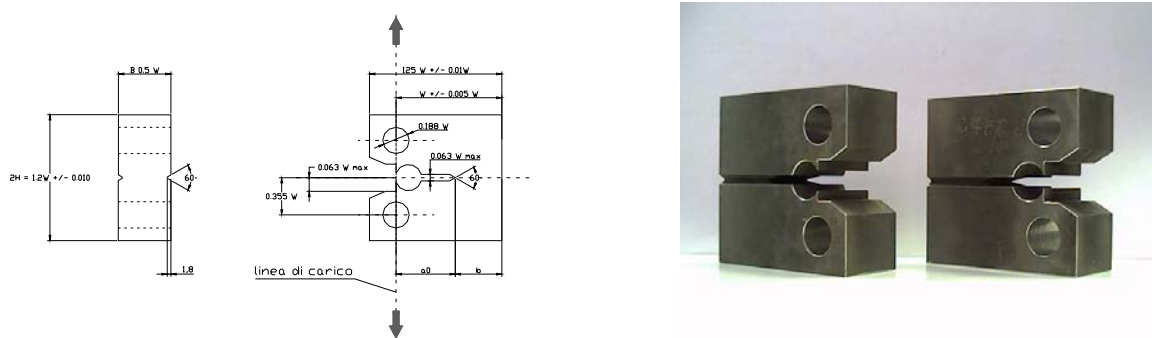


Fig. 1 – Geometria e dimensioni del provino CT secondo normativa ASTM E 1820 -96

Le proprietà meccaniche (tensioni di snervamento  $\sigma_y$  e rottura  $\sigma_r$ , modulo elastico E) dell'Inconel 617 forgiato ed invecchiato a differenti temperature sono state ottenute interpolando dati sperimentali presi da letteratura (Figure 2 e 3).

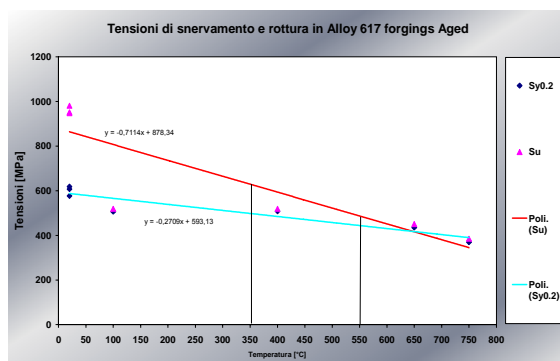


Fig. 2 - Valori delle  $\sigma_y$  e  $\sigma_r$  vs. T (Inconel 617)

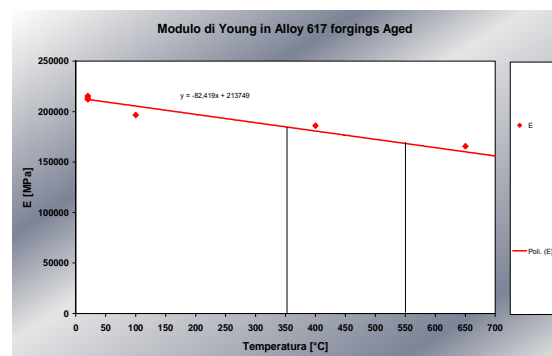


Fig. 3 - Valori di E vs. T (Inconel 617)

Il valore del J critico è stato valutato applicando il “metodo della cedevolezza allo scarico” e le prove sperimentali sono state condotte secondo la normativa ASTM E 1820–96, “Standard Test Method of Fracture Toughness” [4].

## 2.2 Precricatura dei provini

I provini intagliati sono stati inizialmente precriccati a fatica secondo la metodologia proposta da normativa [4]. I provini sono stati soggetti ai seguenti cicli di carico:

- 3 cicli di carico-scarico, per un primo controllo sulla dimensione dell'intaglio,
- 15000 cicli di fatica per far avanzare la cricca,
- 3 nuovi cicli di carico-scarico, di controllo intermedio dell'avanzamento della cricca,
- 6000 cicli di fatica,
- 3 cicli finali di carico-scarico, di controllo finale della dimensione della cricca.

I 3 cicli di carico-scarico sono stati applicati con una velocità di 200 N/s tra 2000 N e 10000 N. Il primo ciclo parte da 150 N per mantenere il controllo di carico della macchina. I carichi ciclici sono stati applicati, invece, ad una frequenza di 10 Hz, oscillando tra un carico minimo di 2000 N ed un carico massimo di 16000 N. La lunghezza della cricca deve essere compresa, secondo normativa, nel range  $1.4 \div 7$  mm. La misura della lunghezza di cricca per fatica è stata valutata mediante il metodo detto “*unloading compliance*” o “cedevolezza allo scarico” [4]. La misura della cedevolezza elastica del provino è ottenuta come la pendenza della retta di regressione lineare delle coppie di dati sperimentali carico – spostamento relative all'ultimo dei 3 cicli di carico-scarico. Determinata la cedevolezza, è possibile ottenere, attraverso una funzione di tipo polinomiale, la lunghezza della cricca propagatasi durante i cicli di fatica. I valori della lunghezza di cricca così ottenuti sono stati comparati con i valori misurati mediante lo stereografo (Fig. 4).

## 2.3 Determinazione del valore di J critico

Per le prove di trazione è stata utilizzata una macchina di prova MTS (modello 312.21) con portata da 70 kN e cella di carico da 100 kN (Fig. 5). L'apertura tra i coltelli è stata misurata nelle prove di precricatura e nelle prove di trazione a temperatura ambiente (22°C) mediante un *clip-on gauge* della MTS (modello 632.03C\_30) con base di misura da 3 mm e corsa massima da 6 mm. Nelle prove ad elevate temperature (350, 550 °C) il provino è stato inserito all'interno di un forno ATS (Fig. 6) e gli spostamenti sono stati misurati mediante un *clip-on gauge* della  $\mu$ EPSILON (modello CG1615.3,45) con base di misura da 3.45 mm, corsa massima da 5 mm e con una temperatura di massimo utilizzo di 600 °C. La temperatura all'interno del forno è stata incrementata con rampe lente, circa 10 °C/min, per evitare shock termici nel provino.



Fig. 4 – Stereografo

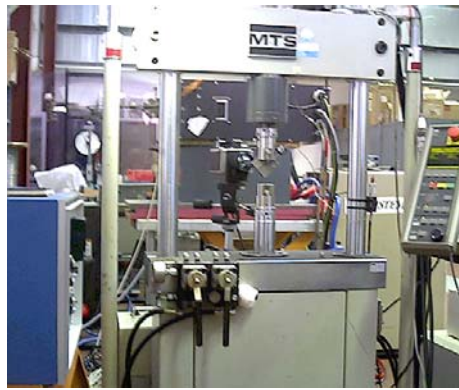


Fig. 5 – Macchina di prova MTS



Fig. 6 – Forno ATS

Le prove di trazione sono state condotte secondo normativa [4] applicando cicli di carico-scarico in controllo di spostamento (Fig. 7). Per ogni ciclo di carico – scarico viene calcolata la cedevolezza e quindi l'avanzamento della cricca prodotto dal carico stesso. Per ogni valore di lunghezza di cricca, viene calcolato il corrispondente valore del J integral, che è dato dalla somma di una componente elastica  $J_{el}$  e di una plastica  $J_{pl}$ :

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (1)$$

La componente elastica  $J_{el}$  è funzione del fattore di intensificazione delle tensioni  $K$ , che è noto per provini soggetti a trazione aventi geometrie definite come quella riportata in Figura 1. La componente plastica  $J_{pl}$ , invece, è funzione dell'incremento dell'area plastica durante la prova di trazione. Mediante questa procedura è possibile, dunque, definire l'andamento dei valori del J-integral  $J_i$  in funzione delle corrispondenti variazioni di lunghezza della cricca  $\Delta a_i$ . Nel grafico (Fig. 8), relativo alla curva  $J_i - \Delta a_i$ , sono tracciate 4 rette parallele alla retta di arrotondamento: due linee denominate *exclusion line* che intersecano l'asse delle ascisse rispettivamente a 0.15 e 1.5 mm e due linee denominate *offset line*, che si ottengono trasladando la *exclusion line* a 0.15 mm rispettivamente di 0.2 e 0.5 mm. La retta di *blunting* o di arrotondamento (o *construction line* [4]) è definita dall'equazione:

$$J = M\sigma_y \Delta a \quad (2)$$

dove la pendenza "M" è uguale a 2 oppure è ottenuta per interpolazione dei dati sperimentali. Il valore di  $J_{lim}$  è definito dall'equazione:

$$J_{lim} = b_0 \sigma_Y / 15 \quad (3)$$

dove 
$$b_0 = W - a_0. \quad (4)$$

ed  $a_0$  è dato dalla somma della lunghezza dell'intaglio e della lunghezza iniziale della cricca propagatasi durante i cicli di fatica.

Si definisce all'interno del grafico  $J_i - \Delta a_i$  una regione a forma di parallelogramma, delimitata inferiormente dall'asse delle ascisse, superiormente dalla retta relativa al  $J_{lim}$ , a sinistra dall' *exclusion line* a 0.15 mm ed a destra dall' *exclusion line* a 1.5 mm (Fig. 8). La prova è ritenuta valida se all'interno di questa zona di esclusione vi sono almeno 5 coppie di dati sperimentali  $J_i - \Delta a_i$ ; almeno una si deve trovare tra la *exclusion line* a 0.15 mm e la *offset line* a 0.5 mm, almeno una tra la *offset line* a 0.5 mm e la *exclusion line* a 1.5 mm. I dati sperimentali all'interno del parallelogramma sono interpolati con il metodo dei minimi quadrati. L'intersezione tra la *offset line* a 0.2 mm e la curva di interpolazione dei dati sperimentali di crescita reale  $\Delta a$  definisce il momento di inizio della propagazione stabile di cricca e viene definito come  $J_q$  ( $J_{bl0.2}$ ). Il  $J_q$  definisce il valore del J critico  $J_{ic}$  del materiale quando sono soddisfatte le 3 seguenti condizioni:

- lo spessore del provino "B" maggiore di  $25 J_{ic} / \sigma_Y$ ,
- $b_0$  maggiore di  $25 J_{ic} / \sigma_Y$ ,
- la pendenza della linea di regressione  $dJ/da$  (valutata nel punto di intersezione tra la *offset line* a 0.2 mm e la curva di interpolazione) minore di  $\sigma_Y$ .

Si definiscono inoltre con  $J_m$  e  $K_{max}$  rispettivamente i valori del J-integral e del fattore di concentrazione delle tensioni corrispondenti al carico massimo applicato durante la prova.

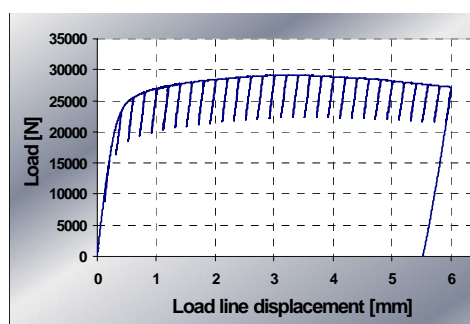


Fig. 7 – Curva carico-spostamento

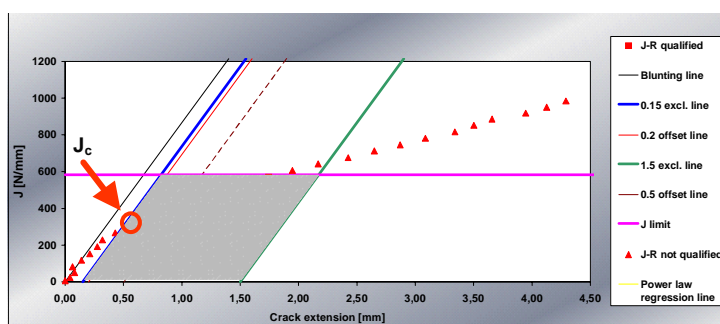


Fig. 8 - Curva J-R

## 2.4 Analisi dei risultati

Le prime prove sono state condotte a temperatura ambiente (22°C) su campioni di Inconel 617 fuso ed invecchiato.

Una prima prova, condotta su un campione di 617 fuso ed invecchiato, non è stata considerata valida, poiché vi erano pochi punti validi all'interno del parallelogramma, principalmente a causa di un basso valore di  $J_{lim}$  dovuto ad un basso valore della tensione di snervamento e ad una limitata propagazione stabile della cricca. Per tale ragione si è pensato di variare le modalità di prova per gli altri 2 campioni, applicando i cicli di carico – scarico in un intervallo di spostamento minore e con una velocità di rampa

maggiore. Sono stati applicati 26 cicli di carico–scarico in controllo di deformazione fino ad arrivare ad una deformazione totale di 1.5 mm. Ogni *step* è stato caratterizzato da:

- una salita della forcina superiore fino a 0.13 mm di deformazione con velocità di 0.005 mm/s,
- una permanenza in questa posizione per 10 secondi, per dare il tempo al materiale di riassetarsi,
- uno spostamento della forcina di 0.08 mm verso il basso con una velocità di 0.005 mm/s,
- permanenza in questa posizione per 1 secondo circa,
- *step* successivo partendo dal valore di deformazione raggiunto dallo *step* precedente.

I risultati delle prove sugli altri 2 campioni (Figure 9 e 10) hanno fornito risultati simili tra loro in termini di J critico, intorno al valore di 61 N/mm.

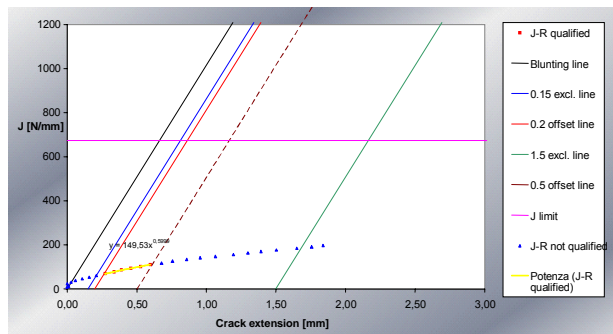


Fig 9 – Curva J-R (Inconel 617, T = 22°C)

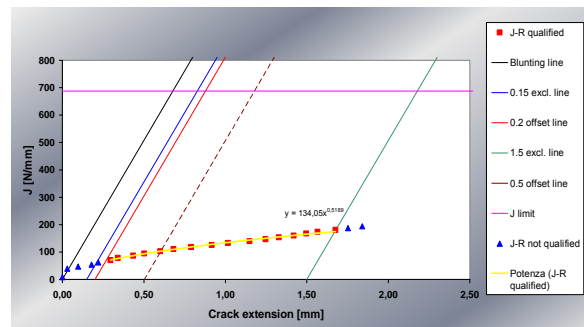


Fig. 10 - Curva J-R (Inconel 617, T = 22°C)

Sono state condotte prove a temperatura ambiente (22° C) su 3 campioni di Nimonic 263 per il calcolo del J critico. Relativamente alla prima prova, vi erano pochi punti J-Δa all'interno del parallelogramma di valutazione ed anche in questo caso si è pensato di variare le modalità di prova per gli altri 2 campioni, applicando 26 cicli di carico–scarico secondo la modalità descritta sopra e questo ha consentito di avere più punti sperimentali all'interno del parallelogramma. I risultati delle prove (Figure 11 e 12) hanno fornito risultati simili in termini di J critico, intorno al valore di 68 N/mm.

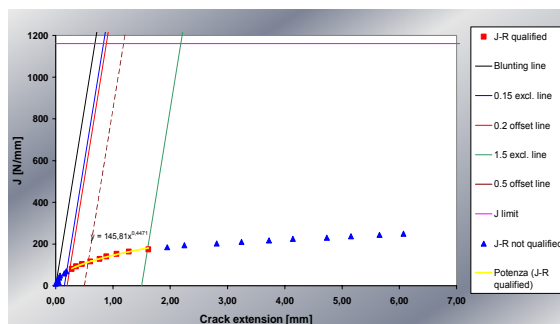


Fig. 11 - Curva J-R (Nimonic 263, T = 22°C)

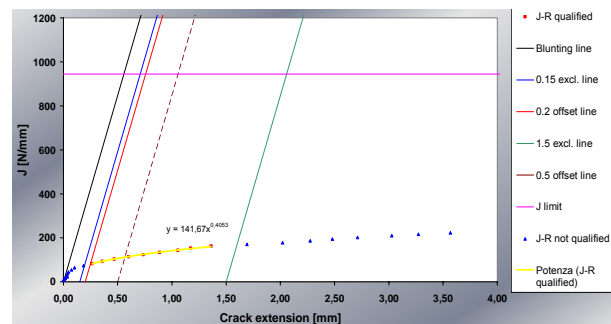


Fig. 12 - Curva J-R (Nimonic 263, T = 22°C)

Sono state condotte prove ad elevate temperature (350, 550 °C) su 6 campioni di Inconel 617 forgiato ed invecchiato per il calcolo del J critico. Mediante osservazione con lo stereografo, durante i cicli di fatica, si è potuto osservare che il fronte della cricca si era propagato parallelo al fronte dell'intaglio, mantenendo e seguendo, il piano preferenziale individuato dagli intagli laterali. Al termine dei cicli di fatica sono stati effettuati tre cicli di carico-scarico come controllo dell'effettivo avanzamento della cricca e come base di partenza per la procedura successiva. Buoni sono stati i riscontri tra le misure ottiche ed i risultati dei tre cicli. In seguito sono stati applicati 30 cicli di carico – scarico in controllo di deformazione. Ogni *step* è stato caratterizzato da:

- una salita della forcina superiore fino ad una deformazione di 0.25 mm con velocità di 0.01 mm/s,
- una permanenza in questa posizione per 10 secondi, per dare il tempo al materiale di riassetarsi,
- uno spostamento della forcina di 0.08 mm, verso il basso, con una velocità di 0.005 mm/s,
- permanenza in questa posizione per 1 secondo circa,
- *step* successivo partendo dal valore di deformazione raggiunto dallo *step* precedente.

Le rampe di salita e discesa sono state programmate in maniera tale da arrivare ad una deformazione totale di 5 mm (massimo intervallo per il *clip on gauge* ad alta temperatura ) dopo i 30 *step*.

Dalle curve J-Δa (Figure 13-18), si evince che i punti sperimentali sono all'interno del parallelogramma di qualificazione.

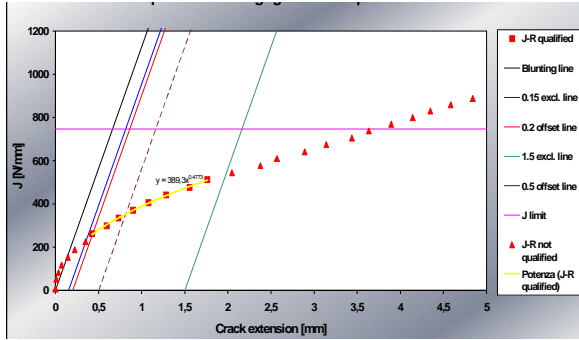


Fig. 13 - Curva J-R (Inconel 617, T = 350°C)

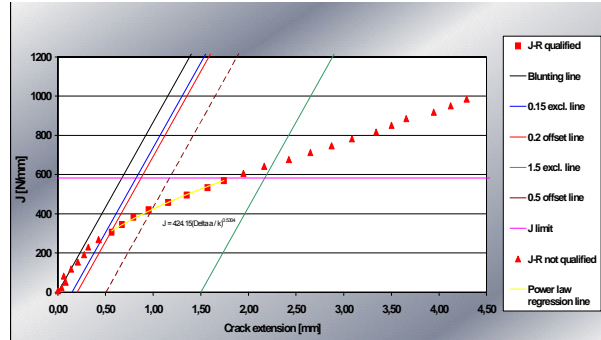


Fig. 14 - Curva J-R (Inconel 617, T = 350°C)

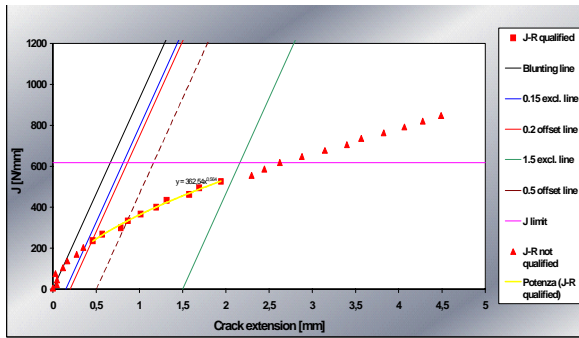


Fig. 15 - Curva J-R (Inconel 617, T = 350°C)

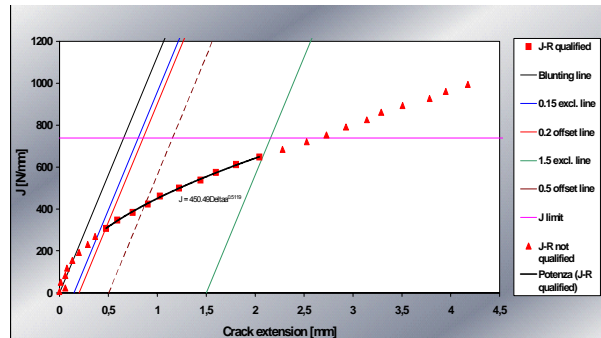


Fig. 16 - Curva J-R (Inconel 617, T = 550°C)

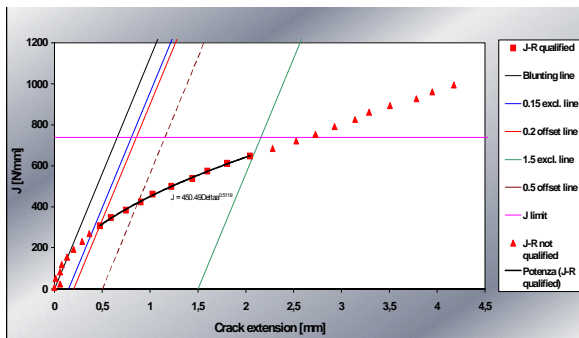


Fig. 17 - Curva J-R (Inconel 617, T = 550°C)

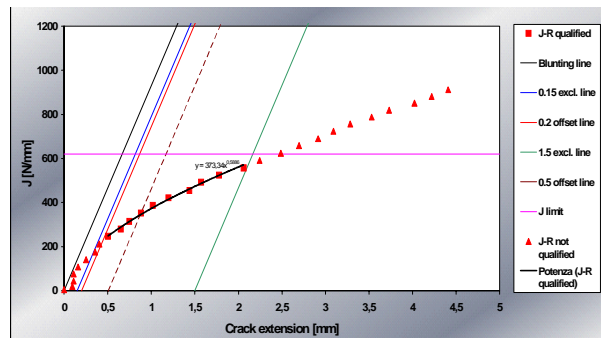


Fig. 18 - Curva J-R (Inconel 617, T = 550°C)

Nella tabella 1 sono riportati i risultati delle prove sperimentali e si evince che sono state soddisfatte le 3 condizioni di validità. Dall'analisi dei risultati sperimentali si osserva che ad elevate temperature vi è una maggiore dispersione dei valori del J critico. Le prove sui campioni di Inconel 617 forgiato ed invecchiato a T = 350°C hanno fornito un valore medio del J critico pari a 285 N/mm. Relativamente alle prove condotte a T = 550°C, si è ottenuto un valore di circa 230 N/mm, tranne per una prova che ha fornito un risultato differente. Una spiegazione può essere dovuta alle modificazioni metallurgiche che subisce il materiale a queste elevate temperature.

Prova	Materiale	T [°C]	$K_{max}$ [MPa/m <sup>0.5</sup> ]	$J_m$ [N/mm]	$J_q$ [N/mm]	$dJ/da$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$J_c$ [N/mm]	$b_0$ [mm]	$25J_c/\sigma_y$ [mm]
1	Inconel 617 fuso inv.	22	91	86	62	141	62	19.95	3.51
2	Inconel 617 fuso inv.	22	87	78	60	128	60	20.35	3.51
3	Nimonic 263 forg. inv.	22	141	145	67	138	67	20.55	2.63
4	Nimonic 263 forg. inv.	22	129	112	69	129	69	16.73	2.73
5	Inconel 617 forg. inv.	350	112.49	262	260	289	260	19.70	13.05
6	Inconel 617 forg. inv.	350	116.08	313	290	339	290	20.26	15.66
7	Inconel 617 forg. inv.	350	121.84	347	305	333	305	19.45	15.31
8	Inconel 617 forg. inv.	550	115	388	345	338	345	19.60	7.99
9	Inconel 617 forg. inv.	550	103.01	237	230	290	230	19.57	12.95
10	Inconel 617 forg. inv.	550	111.92	316	233	305	233	19.67	13.12

Tabella 1 - Risultati delle prove sperimentali

### 3. ANALISI A FATICA DELLE SUPERLEGHE DI NICKEL IN PRESENZA DI INTAGLIO

#### 3.1 Prove di fatica

Sono stati realizzati provini di Inconel 617 fuso con presenza di un intaglio secondo la geometria riportata in Figura 19. Le prove a fatica sono state riprese con una termocamera ad infrarossi per rilevare la variazione della temperatura radiometrica superficiale dei provini. Dall'analisi delle immagini termografiche è stato possibile, mediante il "Metodo Termografico Rapido", valutare il valore della resistenza a fatica.

Per effettuare le prove sperimentali è stata utilizzata una macchina di prova *Instron* (Figura 20) con carico statico massimo da 100 kN ed ampiezza di carico massima da 50 kN. La superficie dei provini è stata verniciata di nero per aumentare il contrasto termico. Le prove sperimentali sono state riprese da uno scanner termico (modello *ThermaCAM SC 3000*). La termocamera, posizionata ad una distanza di circa 0.4 m dal provino, ha permesso di rilevare l'andamento della temperatura superficiale del provino durante tutta la prova assieme alla temperatura ambiente. E' stata acquisita una immagine ogni 50 s. L'immagine digitalizzata contiene 320 x 240 *pixels*; la risoluzione termica è pari a 0.02°C e la risoluzione spaziale a 1.1 mrad. Le immagini termografiche (Figura 20) sono state analizzate mediante il software *Irwin Research 2.01* ed è stata considerato il punto sulla superficie del provino dove la temperatura era massima ("*hot spot temperature*") ossia in corrispondenza dell'apice dell'intaglio. Il parametro fondamentale è la variazione termica  $\Delta T$  tra la temperatura massima sulla superficie del campione durante la prova rispetto alla sua temperatura iniziale prima dell'applicazione del carico.

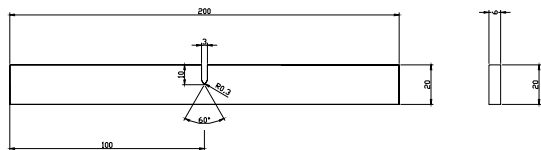


Fig. 19 - Geometria del provino con intaglio

Fig. 20 - Set-up sperimentale ed immagine termica

Sono state condotte prove di fatica, applicando carichi assiali alla frequenza di 20 Hz e con rapporto di carico  $R=0.1$ . In accordo al "Metodo Termografico Rapido", sono stati applicati cicli di tensione crescenti a partire dalla tensione di 60 MPa fino alla rottura, aumentando la tensione di 15 MPa ogni 10000 cicli.

#### 3.2 Metodo Termografico Rapido

Secondo il "Metodo Termografico", il limite di fatica corrisponde a quel valore di tensione che produce un incremento termico nullo su tutta la superficie del provino rispetto alla temperatura iniziale [5].

Quando un provino è soggetto a tensioni cicliche superiori al suo limite di fatica, la sua temperatura superficiale cresce rapidamente in una fase iniziale, quindi la variazione termica raggiunge un valore asintotico  $\Delta T_{AS}$  ed infine si ha un brusco incremento termico appena le deformazioni plastiche diventano rilevanti, portando alla rottura in pochi cicli. Secondo il "Metodo Termografico" [5], il limite di fatica può essere ottenuto diagrammando la curva del valore asintotico  $\Delta T_{AS}$  in funzione del quadrato dell'ampiezza di tensione applicata  $\Delta\sigma^2$  (o  $\Delta T/\Delta N$  versus  $\Delta\sigma$ ) e determinando il valore del limite di fatica  $\Delta\sigma_0$  dall'intersezione con l'asse delle ascisse della curva che interpola linearmente i dati  $\Delta T_{AS} - \Delta\sigma^2$  ( $\Delta T_{AS} = 0$  o  $\Delta T/\Delta N = 0$ ).

Il "Metodo Termografico Rapido" o "Metodo Risitano Rapido" [6] permette di definire il limite di fatica utilizzando teoricamente soltanto un provino. Questo metodo consiste nell'applicare sul provino una successione di carichi cicli di ampiezza crescente alla stessa frequenza (Fig. 21). Dalle prove sperimentali eseguite in passato [5 - 12] è stato constatato che la temperatura di stabilizzazione termica è raggiunta dopo pochi cicli rispetto alla vita a fatica totale; perciò è possibile considerare l'incremento termico ottenuto in un singolo *step* di carico come il valore asintotico  $\Delta T_{AS}$  relativo

all'ampiezza di tensione applicata  $\Delta\sigma$ . Il limite di fatica può, quindi, essere determinato dalla curva che interpola linearmente i dati  $\Delta T_{AS} - \Delta\sigma^2$  come il valore di tensione per il quale si ha  $\Delta T_{AS} = 0$ .

### 3.3 Analisi dei risultati

Applicando il "Metodo Risitano Rapido", è stato ottenuto un valore del limite di fatica dei provini in Inconel 617 fuso con presenza di intaglio intorno al valore di 130 MPa (Fig. 22).

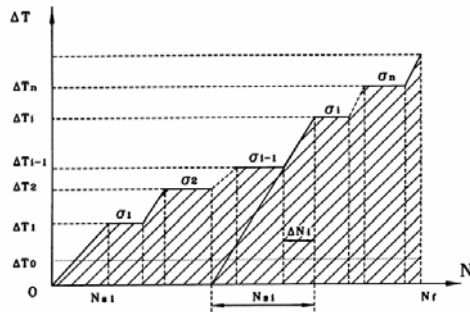


Fig. 21 – Successione di step di carico

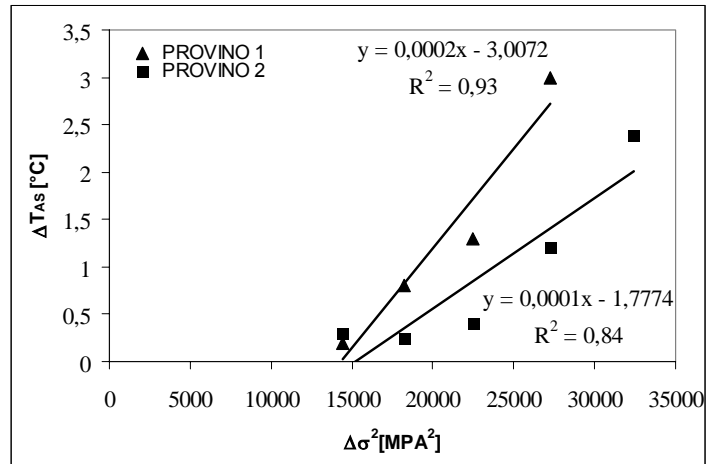


Fig. 22 – Curva  $\Delta T_{AS} - \Delta\sigma^2$

## 4. CONCLUSIONI

Il "Metodo Termografico", applicato in passato su provini lisci, è stato utilizzato con successo per valutare l'effetto di intaglio sul limite di fatica di provini in superlega di Nickel.

Le prove di tenacità hanno permesso, inoltre, di caratterizzare: l'Inconel 617 fuso, che potrebbe essere applicato nelle valvole di una turbina, l'Inconel 617 forgiato e il Nimonic 263 forgiato, che potrebbero essere applicati per la realizzazione di un rotore. Il processo di forgiatura consente, infatti, di ottenere proprietà meccaniche migliori e quindi permette l'applicazione del materiale per componenti maggiormente sollecitati. Le prove sui campioni invecchiati hanno consentito di caratterizzare il comportamento del materiale che si ha dopo il primo periodo di esercizio. Ad esempio le valvole di una turbina sono sollecitate a temperature di 650-750 °C per un periodo esteso (fino a 20 anni). Tenendo conto che un processo di invecchiamento consiste nel mantenere un materiale a temperature dell'ordine di 650 °C per 1000 ore, questo significa che il materiale di un componente di una turbina subisce un processo di invecchiamento dopo 1 - 2 mesi di esercizio.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] J.R. Rice, *ASME-Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, 1968, pp. 379-386.
- [2] P. Livieri, P. Lazzarin, "Calcolo di J-integral in presenza di raggi di fondo intaglio non nulli", XV Congresso AIMETA, 26-29 Settembre 2001, Taormina Italia.
- [3] V. Crupi, S. La Rocca, "Valutazione del J integral mediante analisi termografica", XXXI Convegno AIAS, Parma (PR), 18-21 Settembre 2002.
- [4] ASTM Designation: E 1820-96, "Standard Test Method of Fracture Toughness".
- [5] G. La Rosa, A. Risitano, "Thermographic methodology for the rapid determination of fatigue limit of materials and mechanical components", *International Journal of Fatigue*, 22, 2000, pp. 65-73.
- [6] G. Fargione, A. Geraci, G. La Rosa, A. Risitano, "Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method", *International Journal of Fatigue*, 24, 2002, pp. 11-19.
- [7] V. Crupi, E. Guglielmino, A. Risitano, D. Taylor, "New approaches to assess the fatigue life of welded aluminium ship details", NAV2003, *International Conference on ship and shipping design*, Vol. II, Palermo (PA), 24-27 Giugno 2003, pp. 6.2.1-6.2.10.
- [8] M. Biot, V. Crupi, A. Marinò, G. Risitano, "Thermographic Method for Fatigue Prediction of Friction Stir Welded Light Alloy Panels in Shipbuilding", *HSMV 2005, 7<sup>th</sup> Symposium on high speed marine vehicles*, Napoli (NA), 21-23 Settembre 2005, pp. 81-88.
- [9] A.L. Audenino, V. Crupi, E.M. Zanetti, "Correlation between thermography and internal damping in metals", *International Journal of Fatigue*, Vol. 25/4, pp. 343-351, 2003.



- [10] A.L. Audenino, V. Crupi, E.M. Zanetti, "Thermoelastic and elastoplastic effects measured by means of a standard thermocamera", *Experimental Techniques*, Vol. 28, n. 2, 2004, pp. 23 – 28.

