

■ F A T I C A ■

Modello di calcolo del limite di fatica di materiali metallici contenenti difetti di solidificazione e di lavorazione

H. Herold, M. Streitenberger, A. Casagrande, A. Morri, G. Minak, G.P. Cammarota

Il calcolo della resistenza a fatica di componenti ed elementi strutturali contenenti difetti e disomogeneità ha trovato negli ultimi anni uno sviluppo nell'ambito della teoria degli small-and short cracks.

Il principio è quello di considerare i difetti con lo stesso formalismo della meccanica della frattura, tenendo presente che il fattore di intensificazione degli sforzi è diverso a seconda della geometria del difetto ed introducendo quindi un indice di sensibilità all'intaglio per ogni tipo di difetto.

In questo studio viene effettuata un'analisi dell'equazione di Murakami-Endo per predire la resistenza a fatica in funzione della difettologia del materiale e viene formulata una equazione alternativa che considera sia il valore del K_{Ic} del materiale metallico che quello del K_t all'apice del difetto. I valori del limite di fatica calcolati con il metodo di Murakami-Endo e con quello degli autori sono confrontati con quelli ottenuti in via sperimentale su alcune leghe di alluminio e su un acciaio da costruzione.

Parole chiave: limite di fatica, modelli, cricche corte, difetti

La sempre crescente complessità delle costruzioni e la necessità di saper prevedere con maggior precisione il comportamento dei materiali metallici impiegati ha portato molti autori a considerare la possibilità di esprimere il limite di fatica partendo da alcune caratteristiche strutturali del materiale; però la frattura per fatica è un fenomeno molto complesso nel quale giocano moltissime variabili il cui effetto non è ben distinto l'una dall'altra, nel senso che è difficile definire la condizione limite che determina la transizione tra l'influenza dei diversi parametri ed il loro eventuale sinergismo.

Questi studi hanno portato alla formulazione di oltre 20 uguaglianze che in teoria dovrebbero consentire di valutare con una certa approssimazione la resistenza a fatica di pezzi sottoposti a sollecitazioni anche complesse ad. es. combinazione di flessione e torsione.

Peraltra quasi tutti i modelli proposti presentano la stessa architettura nella formulazione; infatti le proprietà del materiale metallico in esame sono condensate in una grandezza meccanica, come HV_1 oppure R_m , ΔK_{th} o L_f , posta al numeratore della formula, mentre al denominatore figura un parametro geometrico espresso dalla radice quadrata della dimensione del difetto a , come nel modello di Murakami-Endo(1), dalla radice quadrata dell'area del difetto ottenuta dalla proiezione del difetto nella direzione di massima sollecitazione.

Indubbiamente l'esistenza di molti modelli riflette l'importanza che ha questo problema, ma anche la difficoltà di trovarne una soluzione. Infatti le incertezze e le approssimazioni insite in queste formulazioni ricadono sul contributo dei difetti, i cui effetti rimangono tuttora non ben definiti.

Molte di queste formule sono basate sull'assunto che i difetti presenti nei materiali metallici possono essere assimilati a cricche ed il limite di fatica corrisponde a quella sollecitazione ciclica, alla quale questi difetti assimilati ai cracks non propagano.

L'effetto del difetto sulla resistenza a fatica varia notevolmente da un caso all'altro in quanto varia il fattore di intensificazione degli sforzi all'apice del difetto (K_t) e quindi dipende dalla loro natura, grandezza, morfologia oltre che dal numero e dalla disposizione rispetto alla direzione di applicazione del carico. Inoltre, relativamente alle inclusioni non metalliche, è necessario considerare anche la loro deformabilità per valutare l'effetto nocivo sulla resistenza a fatica.

In molti elementi strutturali vi possono essere difetti interni di dimensioni superiori ad 1 mm, ad es. cricche di saldatura, cavità di ritiro nei getti, ecc ed in questo caso il problema viene affrontato con la MFLE. Vi sono però numerosi casi, in cui gli short-cracks controllano il comportamento del materiale come nei materiali impiegati in componenti motoristici od in altre applicazioni critiche.

Pertanto punto di partenza per molte formulazioni è la teoria degli "short-cracks" e la resistenza a fatica di materiali metallici contenenti difetti intrinseci o di processo viene valutata considerando i difetti come cricche corte. Anche molti modelli probabilistici (5-6) comprendono la teoria degli short-cracks, ma tendono ad essere matematicamente sofisticati e generalmente non legati a dati sperimentali od a meccanismi di accrescimento della cricca.

Alla luce di quanto detto ne deriva un quadro complesso per cui le numerose formule elaborate, riportate in gran parte nel lavoro di Murakami-Endo (1), sembrano più esprimere un trend che dare un valore preciso del limite di fatica. Inoltre a molte formule, pur di notevole importanza, è difficile associare un preciso significato fisico, mentre in altre, come in quella di Murakami-Endo, non si considera la microstruttura del materiale, ma solo la durezza Vickers. In altri lavori (2,3,4,) invece viene indicato che la microstruttura può influenzare sia la soglia microstrutturale che meccanica. Inoltre, se si prende in considerazione la difettologia rappresentata dalle inclusioni non metalliche, è più facile ritenere che ossidi di forma squadrata e spigolosa come l'allumina svolgano un ruolo diverso rispetto agli ossidi generici, pur avendo lo stesso valore di parametro geometrico radice quadrata di area; anche poi la diversa deformabilità delle inclusioni non metalliche, come solfuri e silicati rispetto agli ossidi, e la diversa adesione delle inclusioni alla matrice metallica devono essere prese in considerazione ed è improbabile che

H. Herold, M. Streitenberger
Università di Magdeburgo

A. Casagrande, A. Morri, G. Minak, G.P. Cammarota
Università di Bologna

Memoria presentata al 30° Convegno nazionale AIM, Vicenza 17-19 novembre 2004

questi aspetti possano essere espressi solo in funzione del parametro geometrico radice quadrata dell'area, come prospettato nel lavoro di Murakami-Endo (1). Infatti tutti questi fattori sono correlati alla distribuzione delle tensioni all'apice del difetto e quindi al fattore di intensificazione delle tensioni.

APPROCCIO SPERIMENTALE

In questo studio sono stati utilizzati dati metallografici sulla difettologia dei seguenti materiali :

leghe di alluminio

- 5056 lega di base - H38 (UNI 8278);
- 5056 giunto di saldatura TIG (Fig.1-2-3);
- 201 lega di base, colata in sabbia e con trattamento T7 (UNI 8278);
- A356, getto colato in sabbia;
- A360: getto colato in conchiglia ad elevata difettosità (Fig. 4).

acciaio da costruzione

- 23NiCrMo2 (DIN 1-6523) con tenore di zolfo 0,01% e 0,034%.

I dati metallografici sono stati ottenuti mediante osservazione al microscopio ottico di sezioni lappate, misurando la dimensione del difetto maggiore in una determinata area:

- 5056 lega di base: tracce di dendritismo e nessun difetto di altro tipo;
- 5056 giunto di saldatura: macroporosità superficiali e porosità interne di diametro 3,4 µm e microritiri con lunghezza maggiore di 14 µm;
- 201: microporosità diffusa di diametro 12 µm
- A356: microritiri di lunghezza 25 µm e porosità diffusa di diametro 27 µm;
- A360: porosità di 106 µm, cavità di ritiro interdendritiche di 500 µm, dendritismo esteso con valore medio di SDAS di 16 µm.

acciaio da costruzione 23NiCrMo2:

- ossidi: dimensione 8,4 µm (sezione perpendicolare alla direzione di laminazione); poiché l'acciaio è disossidato con alluminio, le inclusioni di ossido sono di Fe₂O₃.Al₂O₃ e allumina Al₂O₃: queste ultime risultano però raggruppate in filari di lunghezza 21 µm con aumento del fattore di intensificazione degli sforzi;
- solfuri: a forma di isole allungate di dimensione 9,5 µm (sezione parallela alla direzione di laminazione) nell'acciaio a tenore di zolfo di 0,034%, mentre nell'acciaio a più basso tenore di zolfo la dimensione massima rilevata è stata di 4,1 µm.

Il numero dei silicati del tipo 2(Fe,Me)O.SiO₂ e le relative dimensioni sono risultati poco significativi.



Fig. 1 – Lega di alluminio 5056 saldata TIG: porosità superficiale.
Fig. 1 – 5056: surface porosity of a TIG weld.

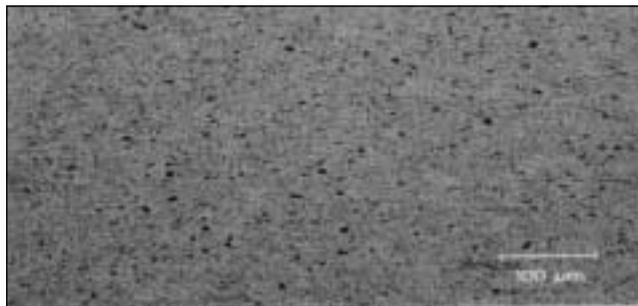


Fig. 2 – Lega di alluminio 5056 saldata TIG: porosità interna.
Fig. 2 – 5056: internal porosity of a TIG weld.

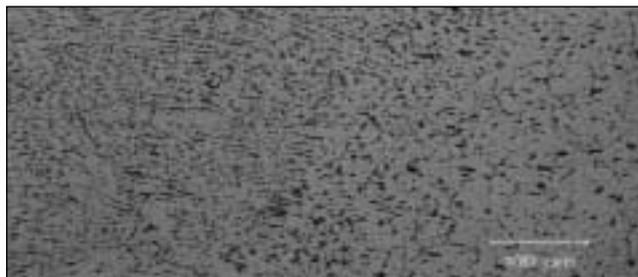


Fig. 3 – Lega di alluminio 5056 saldata TIG: dendritismo e porosità.
Fig. 3 – 5056 TIG weld: dendrite and porosity.

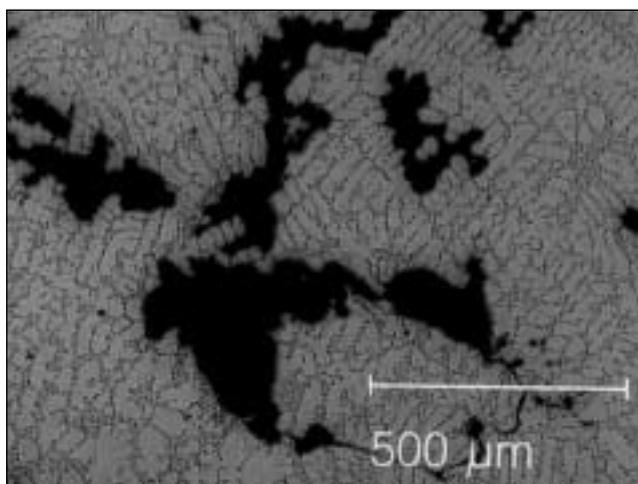


Fig. 4 – Lega di alluminio A360: getto con cavità di ritiro.
Fig. 4 – A 360: cast with numerous shrinkage cavities.

I provini di fatica sono stati prelevati rispettivamente in direzione parallela al giunto di saldatura per la lega di alluminio 5056, normalmente all'asse maggiore del getto per le leghe 201, A356 e A360 e parallelamente alla direzione di laminazione per l'acciaio da costruzione di fabbricazione tedesca; quindi i campioni sono stati sollecitati a fatica in una macchina a flessione rotante con rapporto di carico R = 0,5 e solo i provini della lega A360 sono stati sottoposti ad un ciclo affaticante alternato simmetrico di trazione-compressione con rapporto di carico R = -1 con Vibrofono Mikrotron 654.

I risultati sperimentali sono stati poi confrontati con quelli elaborati utilizzando le formule di Murakami-Endo sotto riportate:

- difetti superficiali:
$$\sigma_{LF} = \frac{1.43 \cdot (Hv + 120)}{\sqrt{area}} \quad [1]$$

• difetti interni:
$$\sigma_{LF} = \frac{1.56 \cdot (Hv + 120)}{\sqrt{\text{area}^2}} \quad [2]$$

Questi approcci hanno portato in taluni casi a risultati soddisfacenti, pur rimanendo sempre un'incertezza di fondo perché queste equazioni non hanno un preciso significato fisico e risultano sempre approssimate. Possono però essere impiegate vantaggiosamente per limitare il numero dei provini nella costruzione della curva di Wöhler.

Inoltre, nonostante queste premesse negative, si è ritenuto utile impostare un diverso approccio per il calcolo teorico del limite di fatica che tenga conto anche del fattore di intensificazione degli sforzi all'apice del difetto. Poiché la dimensione critica di un difetto che una struttura può sopportare è derivabile dalla meccanica della frattura per mezzo dei valori tipici di K_{Ic} in condizioni di deformazione piana, è stata formulata l'espressione sotto indicata:

$$\sigma_{LF} = \frac{R_s}{\sqrt{\left[\left(\frac{K_{Ic}}{R_s}\right)^2\right]^n \cdot (1-R)^{0.5} \cdot K_t}} \quad [3]$$

dove R_s è il carico di snervamento allo 0,2%, R il rapporto di carico e K_t il fattore teorico di intensificazione degli sforzi all'apice del difetto, n la dimensione del difetto.

Per il calcolo del K_t è stata impiegata la formula di Härkegård (7):

$$K_t = 0.78 + 2.243 \cdot \sqrt{D/\rho}$$

dove D è la profondità del difetto e ρ è il raggio di una sfera alla radice del difetto.

I valori del limite di fatica, sia sperimentali che teorici, rilevati sulle leghe in esame sono sotto riportati:

Leghe di alluminio

- 5056 lega di base
 - σ_{LF} (sperimentale) 140 MPa;
 - σ_{LF} (Murakami-Endo) 114 MPa;
 - σ_{LF} (Herold) 136 MPa.
- 5056 giunto saldato TIG
 - σ_{LF} (sperimentale) 119 MPa;
 - σ_{LF} (Murakami-Endo) 83 MPa;
 - σ_{LF} (Herold) 112 MPa.
- 201
 - σ_{LF} (sperimentale) 151 MPa;
 - σ_{LF} (Murakami-Endo) 183 MPa;
 - σ_{LF} (Herold) 165 Mpa.
- A356
 - σ_{LF} (sperimentale) 82 MPa;
 - σ_{LF} (Murakami-Endo) 113 MPa;
 - σ_{LF} (Herold) 91 MPa.
- A360 (dispersione dei dati sperimentali conseguente ad una difettosità troppo elevata)
 - σ_{LF} (sperimentale) 68-93 MPa;
 - σ_{LF} (Murakami-Endo) 119 MPa;
 - σ_{LF} (Herold) 87 MPa.

Acciaio da costruzione

- acciaio da costruzione 23NiCrMo2 a basso tenore di zolfo
 - σ_{LF} (sperimentale) 457 MPa;
 - σ_{LF} (Murakami-Endo) 458 MPa;
 - σ_{LF} (Herold) 450 MPa.
- acciaio da costruzione 23NiCrMo2 a più alto tenore di zolfo
 - σ_{LF} (sperimentale) 432 MPa;
 - σ_{LF} (Murakami-Endo) 434 MPa;
 - σ_{LF} (Herold) 427 MPa.

Esempi di applicazione delle formule sopra riportate, che illustrano la variazione del limite di fatica all'aumentare della dimensione del difetto, sono riportati nelle figure 5 e 6.

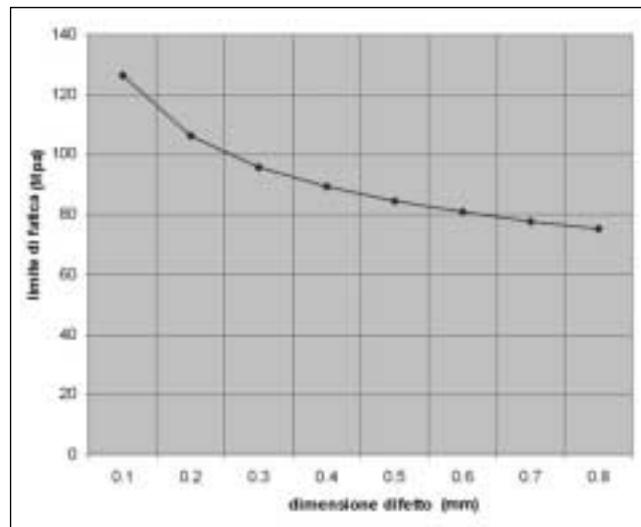


Fig. 5 – Applicazione dell'equazione [3]: lega di alluminio 5056.

Fig. 5 – 5056: application of equation [3].

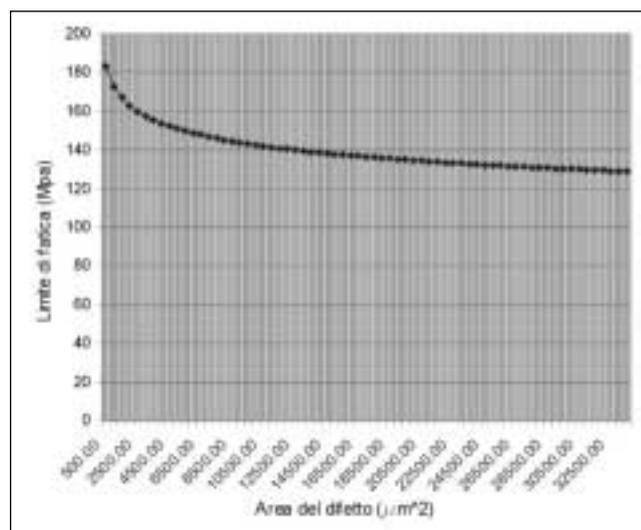


Fig. 6 – Applicazione dell'equazione [2]: lega di alluminio A360.

Fig. 6 – A 360: application of equation [2].

CONCLUSIONI

Dato il numero limitato di applicazioni, è doveroso dire che la possibilità di calcolare per via teorica il limite di fatica è un problema ancora aperto.

Sulle base dei risultati conseguiti si può comunque affermare che la formula di Murakami-Endo è più appropriata per i materiali ferrosi, mentre l'espressione di Herold et alii sembra bilanciata per tutti materiali presi in esame in questo studio, in particolare se i difetti rilevati sono di dimensioni normali; infatti è risultato evidente che le inclusioni non metalliche riducono la resistenza a fatica in funzione della loro natura e della loro morfologia.

Inoltre, se la difettosità del campione è elevata, come si rileva nei getti che presentano difetti di solidificazione del tipo macroritiri, è difficile trovare una correlazione tra dati sperimentali e dati teorici; in questo caso però l'equazione di Herold è preferibile a quella di Murakami-Endo, perché risulta più conservativa.

Degno di nota è il fatto che ambedue le formulazioni rilevi-

no che il limite di fatica è condizionato dalla difettosità del materiale e che per l'acciaio un aumento del tenore di zolfo comporti una riduzione del limite di fatica.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Y.Murakami , M.Endo, "Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength" Fatigue, 1994, vol. 16, 163-182.
- 2) K.J. Miller, 27th John Player Lecture, Proc. Inst. Mech. Engrs. , 1991, 205
- 3) K.J. Miller, Mater. Sci. Technology, 1993, 9, 453
- 4) K.J. Miller, Fatigue Fract. Engng.. Mater. Struct., 1993, 16 , 931
- 5) B.N.Cox, W.L.Morris , Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 1987,10,419
- 6) R.Arone, Engineering Fracture Mechanics, 1981,14,189
- 7) G. Härkegård, "An effective stress intensity factor and the determination of the notched fatigue limit". Proceedings of an international conference on fatigue thresholds, fundamentals and engineering applications, Stockholm, June 1-3, 1981, Vol. II, 867

————— A B S T R A C T —————

MODELS PREDICTING THE FATIGUE LIMIT STRESS OF METALS CONTAINING DEFECTS OF SOLIDIFICATION AND PROCESSING

Keywords:
fatigue limit, models, short cracks, defects

Many workers have developed models for the prediction of the fatigue limit, which relies on the assumption that small defect due to the manufacturing process can be treated as cracks.

Thus there are more than 20 approximate equations for the calculation of the endurance limit, but the quantitative effect of the metal defects to the complicated nature of fatigue phenomena is not clearly defined. The very important model of MurakaMi-Endo considers the Vickers hardness as the representative material parameter and the square root of the

defective area obtained by projecting a small defect or crack onto a plane perpendicular to the maximum principal stress. The authors instead have proposed an empirical equation based on the stress intensity factor at the tip of a defects with a complex shape.

The materials investigated in the present study are the aluminium alloys 5056, 201, A356, A360 and the building steel 23NiCrMo2 with different sulphur content and some fatigue test series on specimens are carried out.

The results from fatigue tests are compared with the calculated fatigue limit obtained from the equation of MurakaMi-Endo and from the equation proposed by the authors.

Both models demonstrates the capability to point out the effect of small defects on fatigue limit, but obviously these methods needs additional verification with large series of tests.