



Influenza dell'attrito e della rugosità sullo stato di sforzo all'apice della cricca in condizioni di fatica da rotolamento

M. G. Tarantino

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Politecnico di Milano, via La Masa 01, 20156, Milano

ABSTRACT. Many mechanical components under RCF exhibit a complex mechanism of failure due to the nature of the experienced fatigue loadings experienced. According to scientific literature the crack fracture morphology is very complex and the crack front is really tortuous resembling of a “factory roof type”. Crack propagation under RCF often occur in mode III or in mixed mode. In this paper the influence of friction and of crack surface roughness during contact loadings have been investigated both experimentally both theoretically. Fracture surfaces have been metallurgically analyzed after etching and an analytical friction model have been applied to estimate the local crack tip stress field as well as the estimate the effective crack driving force.

SOMMARIO. Il cedimento dei componenti meccanici in condizioni di fatica da rotolamento è molto complesso per via della natura dei carichi affaticanti. La letteratura scientifica riporta che la morfologia delle superfici di frattura è spesso caratterizzata da un fronte di cricca tortuoso e non planare e la propagazione può avvenire in modo III o in modo misto. In questa memoria si è cercato di analizzare l'influenza dell'attrito e della rugosità delle superfici durante il contatto ciclico. Tale analisi è stata affrontata sia dal punto di vista sperimentale, attraverso lo studio morfologico e metallurgico delle superfici di frattura, sia dal punto di vista analitico attraverso l'applicazione di un modello elasto-plastico di attrito finalizzato ad indagare lo stato di sforzo locale che si instaura all'apice della cricca propagante durante il contatto.

KEYWORDS. Friction; Rough crack; RCF loadings; Crack propagation.

INTRODUZIONE

Il cedimento e la meccanica del danneggiamento dei componenti soggetti a carichi affaticanti da contatto assume una notevole rilevanza industriale: la perdita delle funzionalità meccaniche dei componenti di impiego nelle trasmissioni di potenza (ingranaggi, cuscinetti, etc.) è, infatti, causa di ingenti perdite economiche per l'industria meccanica. Il danneggiamento in condizioni di fatica da rotolamento è per le ragioni indicate, oggetto di studio da parte della comunità scientifica: la complessità del meccanismo di danneggiamento è legata alla natura dei carichi che sollecitano il componente. Il cedimento avviene, infatti, per nucleazione e successiva propagazione di una cricca nucleatasi a partire da un preesistente difetto presente nel materiale. Sperimentalmente in condizioni di fatica da rotolamento, si è osservato una propagazione della cricca di fatica in modo III o in modo misto. A causa della combinazione dei carichi applicati, la morfologia delle superfici di frattura dei componenti risulta molto complessa e caratterizzata da un fronte di propagazione tortuoso e tridimensionale che la letteratura scientifica chiama “*factory roof*”[1-4]. Tuttavia dal momento che, in condizioni di fatica da rotolamento, le superfici della cricca propagante sono sempre in contatto l'interferenza di tali superfici non può essere trascurata nello studio e nella modellazione del meccanismo di danneggiamento. Per via del contatto tra le superfici durante la propagazione, le condizioni di carico locali all'apice della cricca sono differenti da quelle



nominali. Il contatto tra superfici di frattura, nella realtà caratterizzate da un profilo di rugosità, dà luogo a fenomeni dissipativi di attrito irreversibili.

Scopo del presente lavoro è sia quello di evidenziare sperimentalmente l'influenza dell'attrito e della rugosità nella propagazione in condizioni di fatica da rotolamento, e sia quello di modellare analiticamente lo stato di sforzo locale che si instaura all'apice della cricca per effetto del contatto tra le superfici rugose.

DETTAGLI SPERIMENTALI

Materiali

Il materiale analizzato è un acciaio per cuscinetti. Il materiale è stato dapprima caratterizzato dal punto di vista delle proprietà meccaniche e del comportamento a fatica. I risultati delle prove cicliche e monotone sono riassunti in Tab. 1.

Materiali	UTS [MPa]	σ_y [MPa]	$\sigma_{y,cyclic\ 0.2\%}$ [MPa]
Bearing steel	2364	1982	2072

Tabella 1: Proprietà meccaniche del materiale.

Procedura di prova

Le prove di fatica sono state condotte su provini micro-intagliati. In particolare sono state adottate tre dimensioni del difetto espresse in termini del parametro $\sqrt{\text{area}}$, pari a 630 μm , 315 μm e 220 μm (Fig. 1a). Dettagli sulla geometria dei provini sono riportati in [5]. L'aspetto innovativo e fondamentale della metodologia di prova consiste in una fase preliminare di pre-riccatura finalizzata a promuovere la propagazione coplanare.

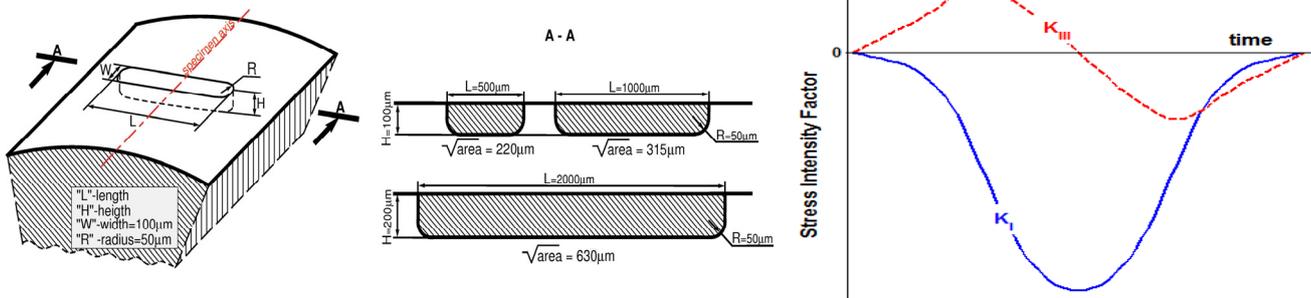


Figura 1: Dettagli sperimentali: dimensione dei micro-intagli ; b) percorso di carico adottato nelle prove di fatica multiassiale.

Le prove di fatica multiassiale sono state condotte in controllo di forza/coppia sulla macchina di prova assiale-torsionale MTS 809. Il percorso di carico adottato è rappresentativo delle condizioni tipiche di fatica da rotolamento ed è riportato in Fig. 1b.

I test sono stati interrotti sulla base della massima lunghezza di propagazione della cricca superficiale $a_s < 1\text{ mm}$ o sulla base del massimo numero di cicli di fatica ($N_f = 2 \cdot 10^6$) nel caso di comportamento prossimo alla soglia.

Risultati sperimentali

L'analisi delle superfici frattografiche mette in evidenza la modalità di cedimento osservata sperimentalmente: il percorso di carico fuori fase favorisce una marcata propagazione coplanare accompagnata da un'inibizione delle cricche superficiali di branch in modo I. Un altro aspetto peculiare emerso dall'analisi delle superfici di frattura è l'evidenza di un'intensa deformazione plastica e di un'apertura tra le facce della cricca coplanare (per ulteriori dettagli si rimanda a [5]).

INFLUENZA DELL'ATTRITO

Evidenza sperimentale

Da una approfondita analisi metallografica delle superfici di frattura, queste appaiono ribattute e emergono in maniera evidente le zone che durante la propagazione sono state interessate da fenomeni di deformazione irreversibili. Le superfici frattografiche sono state dapprima attaccate in una soluzione al 1.5% di Nital e successivamente osservate al microscopio elettronico (SEM) al fine di evidenziare la eventuale presenza di cambiamenti microstrutturali nel materiale.

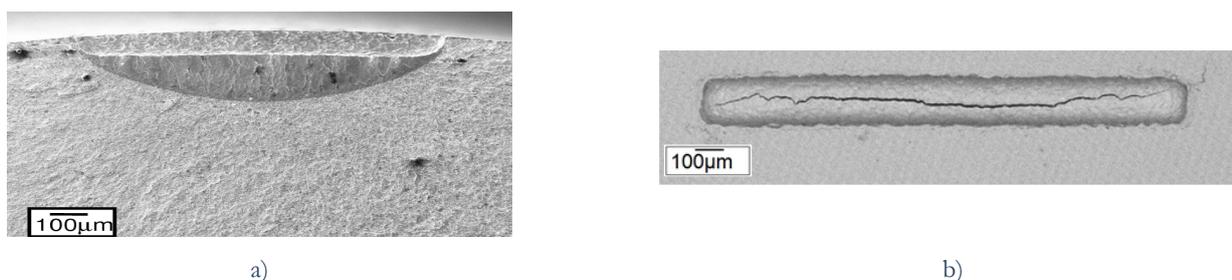


Figure 2: Superfici frattografiche, provino con difetto $\sqrt{\text{area}} = 315\mu\text{m}$: a)-b) prova a $\Delta K_{III}/\Delta K_{th,I} = 0.7$ per $N = 1.2 \cdot 10^5$ cicli con sezione centrale e vista dall'alto rispettivamente.

Il dettaglio ad alto ingrandimento di una regione all'interno della zona di propagazione coplanare (Fig. 3b) dopo attacco chimico rivela la presenza di due differenti zone a contrasto cromatico: le aree "più grigie" rappresentano quelle zone in cui si sono verificati fenomeni di ossidazione, mentre le aree "meno grigie", non essendo state ossidate, rappresentano le regioni in cui la microstruttura del materiale è quella originale. Ragionevolmente pensando ad un contatto rugoso tra le superfici, si potrebbe quindi supporre che le aree di colorazione più marcata costituiscono le zone in cui i picchi di rugosità sono venuti a contatto ed in cui si sono verificati successivi fenomeni irreversibili dissipativi/ossidativi. Similmente le zone con una caratterizzazione cromatica meno intensa, rappresenterebbero le aree che durante l'azione di scorrimento legata al carico ciclico torsionale non sono venute a contatto. A conferma di quanto appena indicato, in Fig. 3d, si riporta un dettaglio ad ingrandimento più elevato delle due zone con differente colorazione, dove è possibile evidenziare la microstruttura originale del materiale. Sono state effettuate inoltre analisi chimiche in tali aree, dove si è riscontrata la presenza di ossigeno nelle zone "più grigie". Infine il dettaglio, riportato in Fig.3, dell'apice della cricca coplanare permette chiaramente individuare i segni dello scorrimento durante l'applicazione dei carichi affaticanti.

Stato di sforzo all'apice della cricca

L'intensa deformazione plastica tra le facce della cricca propagante è sicuramente la chiave di comprensione del meccanismo fisico di danneggiamento. Contrariamente a quanto sarebbe lecito attendersi per effetto della combinazione di un carico di torsione alternata e compressione ciclica, lo stato di sforzo locale realmente presente all'apice della cricca risulta ben diverso da quello nominale. Infatti i fenomeni dissipativi legati all'attrito sono sensibilmente ridotti a causa dell'apertura, intesa come deformazione permanente delle facce della cricca. Per stimare quantitativamente lo stato di sforzo che caratterizza localmente il fenomeno, è stato sviluppato un modello di attrito analitico allo scopo di stimare il ΔK_{III} effettivo.

Durante l'applicazione del ciclo di carico le superfici rugose delle facce della cricca propagante vanno a contatto. Si instaura quindi un campo di distribuzione di pressioni che può essere ricondotta, attraverso il coefficiente di attrito di Coulomb, ad una distribuzione di sforzi tangenziali di attrito. L'entità di tali sforzi riduce quindi il ΔK_{III} disponibile alla propagazione:

$$\Delta K_{III,eff} = \Delta K_{III,nom} - \Delta K_f \quad (1)$$

dove ΔK_f è il fattore di intensificazione degli sforzi legato agli sforzi di attrito durante il contatto.

Il modello analitico utilizzato è un modello 2D elasto plastico di una cricca all'interno di un semipiano infinito, per una descrizione dettagliata del modello si rimanda a [5].

Tuttavia l'applicazione del modello di attrito nelle condizioni di carico considerate, ha evidenziato che l'apertura tra le facce della cricca propagante è tale da impedire un contatto esteso tra le superfici di frattura durante l'applicazione del



carico di compressione. Per questa ragione, dopo aver accuratamente digitalizzato e discretizzato il profilo sperimentale ricavato a seguito di lappature lungo il micro-intaglio [5] (Fig. 4a), si è osservato che l'instaurarsi degli sforzi di contatto è limitato solo a pochi elementi del profilo della cricca (Fig. 4b). Conseguentemente anche la resistenza opposto allo scorrimento per effetto dell'attrito è contenuta. Per il calcolo analitico degli sforzi di contatto si è utilizzato un modello basato sull'algoritmo di Newman per la closure [6](Fig. 4a).

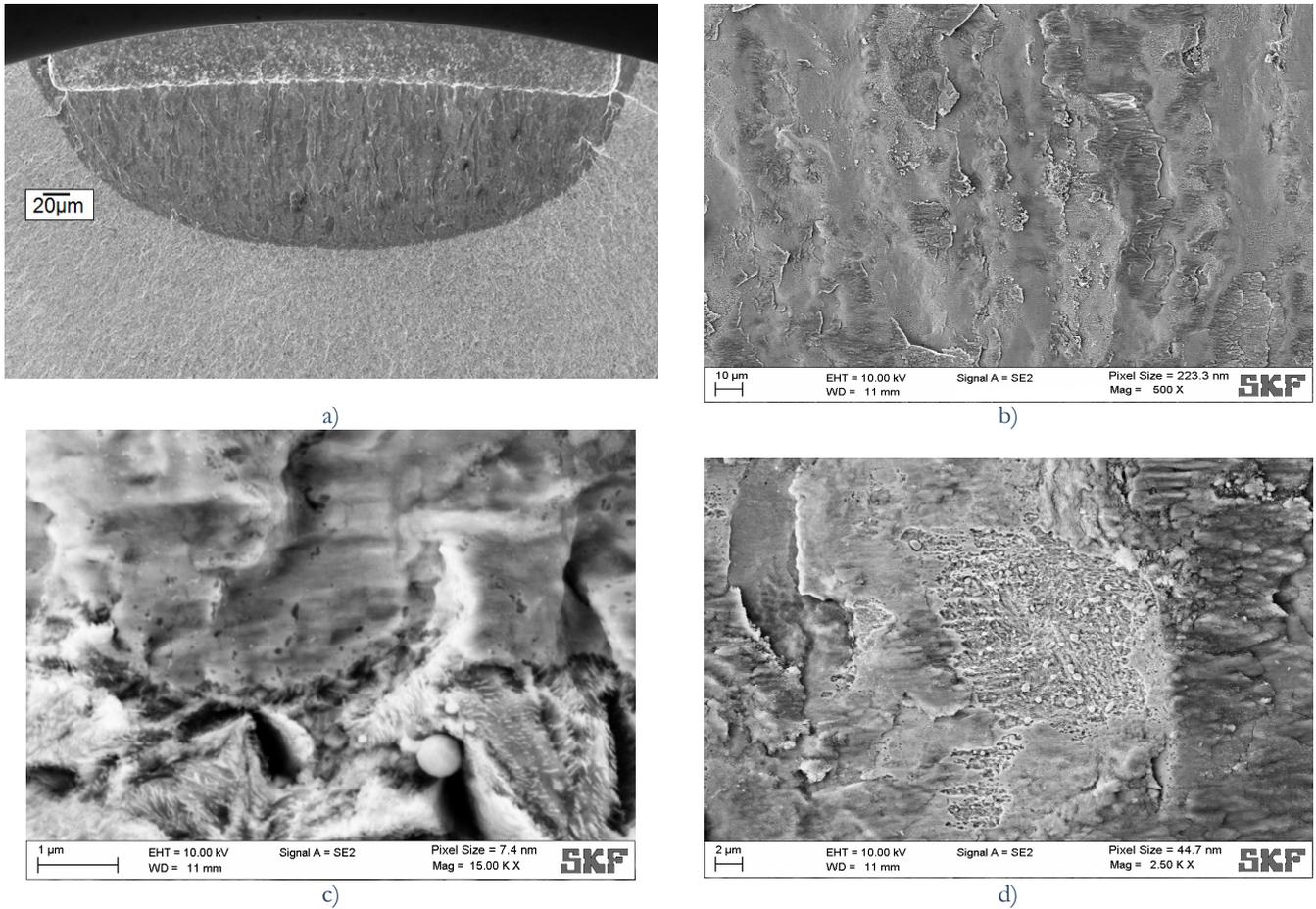


Figure 3: Analisi metallografica della superficie frattografica, provini con difetto $\sqrt{a_{area}} = 630\mu\text{m}$: a) $\Delta K_{III}/\Delta K_{th,I} = 0.87$ per $N = 1.2 \cdot 10^5$ cicli con percorso di carico 2; b) dettaglio di una regione al centro della regione di propagazione coplanare dopo attacco chimico; c) dettaglio ad elevato ingrandimento dell'apice della cricca coplanare; d) dettaglio ad elevato ingrandimento delle zone a differente colorazione cromatica.

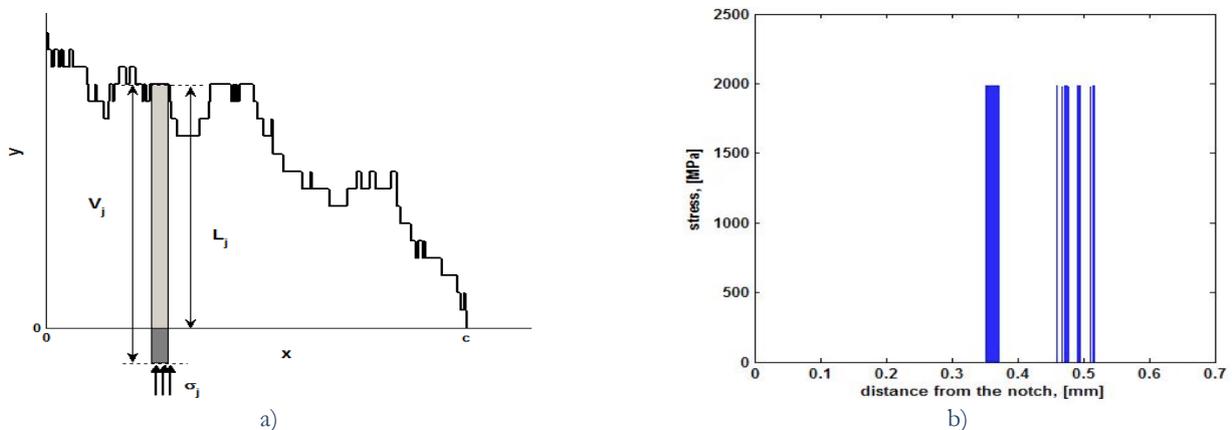


Figure 4: a) Discretizzazione del profilo sperimentale della cricca propagante [5]; b) sforzi di contatto che si instaurano per effetto del contatto imposto dal carico di compressione.



A seguito dell'analisi fatta è quindi possibile concludere che lo stato di sforzo all'apice della cricca è differente da quello nominale e il ΔK_{III} effettivo disponibile per la propagazione è solo in quantità molto modesta ridotto da fenomeni dissipativi di contatto, quest'ultima affermazione sarebbe da considerarsi la spiegazione dell'estesa propagazione coplanare osservata.

CONCLUSIONI

In questa memoria sono state evidenziate sperimentalmente le principali caratteristiche morfologiche e metallografiche delle superfici di frattura di provini micro-intagliati sollecitati con carichi affaticanti rappresentativi delle condizioni di sollecitazione peculiari della fatica da rotolamento (torsione alternata + compressione ciclica sfasata di 90°). Si è riscontrato, a seguito di un'analisi metallografica dopo attacco chimico in soluzione di 1.5% Nital, che le superfici di frattura sono caratterizzate da due differenti tonalità cromatiche di grigio: quelle più intense rappresentano le aree ossidate dove il contatto rugoso ha innescato dei fenomeni di deformazione irreversibili, quelle meno intense sono caratterizzate invece da una microstruttura del materiale non danneggiata.

Si è inoltre stimato l'effettivo stato di sforzo che caratterizza l'apice della cricca: a tal scopo è stato utilizzato un modello analitico di attrito per stimare la riduzione del ΔK_{III} per effetto delle tensioni tangenziali dissipative che si instaurano nel contatto. È emerso che la deformazione permanente tra le facce della cricca è tale da impedire un contatto esteso tra le superfici a seguito dell'applicazione del carico di compressione e che il ΔK_{III} effettivo disponibile alla propagazione è di poco ridotto rispetto a quello applicato.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Y. Murakami, Y. Fukushima, K. Toyama, S. Matsuoka, *Engineering Fracture Mechanics*, 75 (2008) 306.
- [2] J. Pokluda, K. Slamecka, P. Sandera, *Eng. Fract. Mech.*, 77 (2010) 1763.
- [3] E. K. Tschegg, *Material Science and Engineering*, 54 (1982) 127.
- [4] H. Nayeb-Hashemi, F. A. McClintock, R. O. Ritchie, *International Journal of Fracture*, 23 (1983) 163.
- [5] M. G. Tarantino, S. Beretta, S. Foletti, J. Lai, A comparison of Mode III threshold under simple shear and RCF conditions, *Engineering Fracture Mechanics*, (2011, in press).
- [6] J.C. Newmann, Jr, *ASTM STP 748* (1981) 53.