

PROPAGAZIONE DI FRATTURE IN MODO II IN ACCIAI PER APPLICAZIONI FERROVIARIE

S. Beretta, A. Vavassori

*Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica
Via La Masa 34, 20158 Milano*

ABSTRACT

Contact fatigue is composed by different damage mechanisms under the action of cyclic loads. From surface microfractures, mainly nucleated because of ratchetting, it is eventually possible to have the formation of 'pitting' and 'spalling' failures under mode II fracture propagation.

The scope of this research is to investigate the propagation of mode II cracks in a rail steel with a 'four-point bending' apparatus. The results show that cracks tend to propagate under mode II only for a few hundreds μm : after this propagation cracks develop either mode I branching or a diffuse mechanical damage at the crack tip.

SOMMARIO

La fatica da contatto coinvolge diversi meccanismi di danneggiamento meccanico. A partire dalla nucleazione di fratture superficiali si possono avere rotture per 'pitting' e 'spalling' principalmente per effetto della propagazione in modo II.

Scopo della presente ricerca è investigare la propagazione per fatica in modo II in un acciaio perlitico per rotaie. I risultati parziali della ricerca mostrano che le cricche propagano in modo II solo per alcune centinaia di μm , sviluppando quindi diverse tipologie di arresto per 'branching' in modo I o per formazione di un danneggiamento meccanico diffuso.

INTRODUZIONE

Rotture per fatica da rotolamento sono state frequentemente osservate sulle superfici di elementi di macchine come cuscinetti, ingranaggi, rulli per la deformazione plastica, ruote ferroviarie, etc. La fatica da contatto per rotolamento risulta essere soggetta a numerosi parametri, quali differenti condizioni di carico, proprietà dei materiali, condizioni delle superfici di contatto e di lubrificazione, che rendono la comprensione di tale fenomeno, a livello quantitativo, alquanto complessa da un punto di vista meccanico. A fronte della complessità dell'argomento è universalmente riconosciuto come nella fatica da contatto il ruolo più importante è svolto dalla propagazione in modo II. E' infatti per azioni tipo modo II che le microcricche superficiali originate per fenomeni di ratchetting possono dare origine a fratture per 'pitting' o 'spalling' [1-2].

Sebbene negli ultimi anni numerose ricerche siano state svolte [2-7], le conoscenze attuali sulla crescita di cricche per fatica in modo II sono ancora alquanto limitate e contraddittorie, se confrontate con le conoscenze relative al modo I. Da una parte infatti

i risultati appaiono influenzati dal tipo di prova, dall'altra i diversi materiali investigati (leghe Al, acciai strutturali, acciai per cuscinetti, acciai maraging) sembrano mostrare, a parità di tipo di sperimentazione, proprietà abbastanza differenti. Per tale motivo, nell'ambito di una ricerca coordinata sulla fatica da contatto in ambito ferroviario, è stata iniziata un'indagine sulla propagazione per fratture in modo II nell'acciaio 900A ampiamente impiegato in ambito ferroviario. La presente memoria illustra i primi risultati consolidati di tale ricerca.

ESPERIMENTI

Materiale

Il materiale oggetto della presente indagine è un acciaio per rotaia tipo 900A le cui caratteristiche meccaniche ricavate su provini estratti da rotaie sono: carico di rottura $R_m = 890$ MPa, snervamento monotono $R_{p0.2} = 500$ MPa e snervamento ciclico $R_{cyc0.2} = 440$ MPa.

Propagazione in modo I

Il materiale è stato dapprima soggetto ad una serie di prove di propagazione in modo I a rapporti di ciclo $R=0.7$ ed $R=0.1$ su provini CT al fine di avere dei dati di riferimento per la propagazione in modo I. In particolare la parte bassa della curva di propagazione ad $R=0.7$ è stata ottenuta mediante prove tipo ΔK -decreasing [8]. In Fig. 1 è riportato il tipo di provino adottato e le curve di propagazione ottenute.

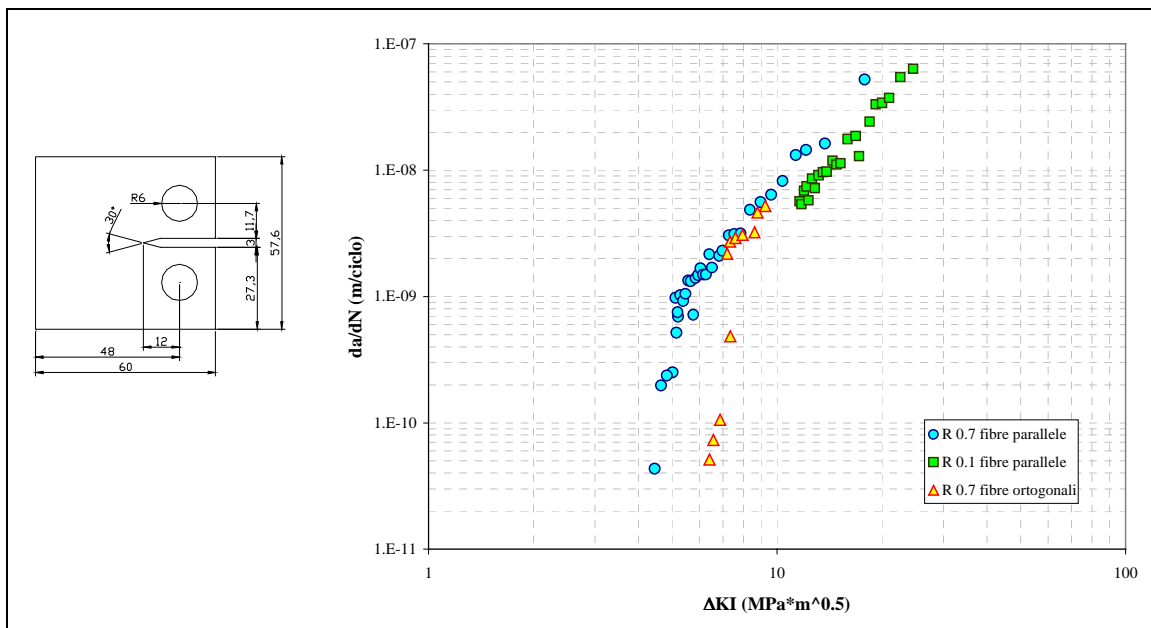


Figura 1: Caratterizzazione a propagazione in modo I per l'acciaio 900A.

Si può notare che la microstruttura tipicamente anisotropa degli acciai perlitici si riflette in una forte anisotropia della curva di propagazione ad $R=0.7$ nella regione vicina alla soglia. Considerando che a tale rapporto di ciclo la 'closure' ha un effetto trascurabile e che quindi $\Delta K = \Delta K_{eff}$, la soglia di propagazione effettiva risulta $\Delta K_{eff} = 4.4$ MPa \sqrt{m} e

$\Delta K_{\text{eff}} = 6.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ rispettivamente per propagazione in direzione parallela alle fibre e perpendicolare.

Prove di propagazione in modo II

Le metodologie di prova per la propagazione a fatica in modo II sono molto diversificate: i) dispositivi tipo CTS che richiedono un dispositivo di prova abbastanza compatto ed adatto ad osservazioni dirette al SEM [7]; ii) dispositivi tipo ‘three point bending’ adottati da Gao e Miller per l’analisi della propagazione di microcricche [5]; iii) dispositivi tipo ‘four-point bending’ adottati in modo particolare da Otsuka [4] per prove su materiali diversi (Fig. 2); iv) un dispositivo tipo ‘cantilever’ messo a punto da Murakami [2-3] per prove in modo II su acciai strutturali con provini ad elevato spessore.

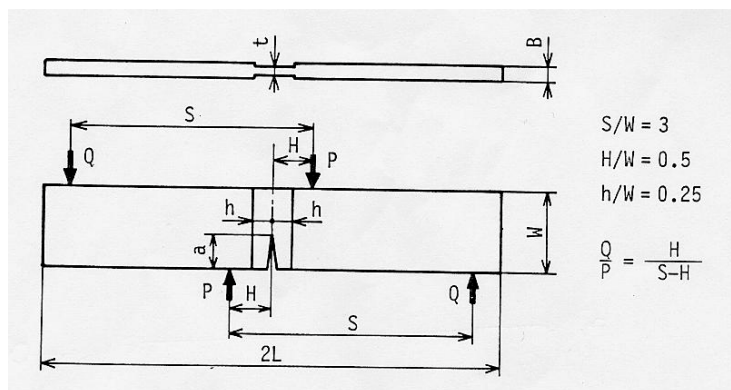


Figura 2: Tipico schema del ‘four-point bending’ per prove in modo II [4].

Tutti i dispositivi in letteratura eccetto quello di Murakami permettono l’osservazione diretta delle cricche tramite repliche o microscopio ottico. Sulla base di tale semplice possibilità di rilievo è stato appositamente costruito un dispositivo simile a quello di Otsuka riportato in Fig. 3 insieme con il provino, dello spessore di 5 mm, che viene in esso montato. Il provino viene caricato per mezzo di due bracci ai quali è collegato per attrito mediante un serraggio a viti.

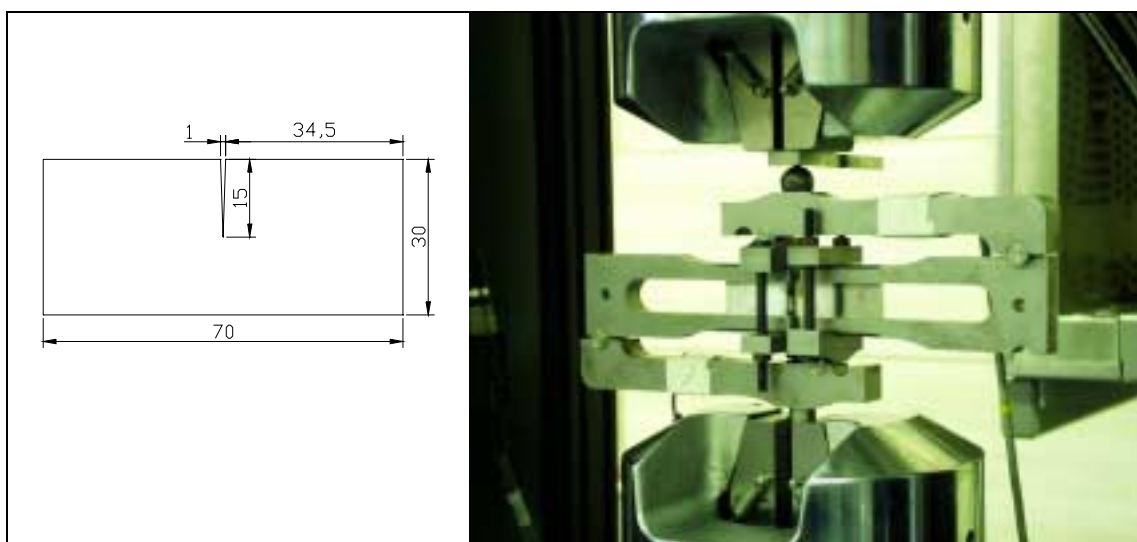


Figura 3: Dispositivo di prova tipo ‘four point bending’: a) il provino; b) il dispositivo di prova montato sulla macchina di prova assiale.

Le prove di fatica in modo II si sono quindi svolte montando il dispositivo di prova su una macchina di prova assiale servoidraulica a frequenze di prova comprese tra 1Hz e 10Hz.

Provino	Carico Min [N]	Carico Max [N]	ΔK_{II} MPa\sqrt{m}	Direzione fibre
Rot1	1000	20000	30	Parallele all'intaglio
Rot2	1000	16500	25	Parallele all'intaglio
Rot3	1000	14000	20	Parallele all'intaglio
Rot4	1000	10500	15	Parallele all'intaglio
Rot5	1000	10500	15	Ortogonalmente all'intaglio
Rot6	1000	14000	20	Ortogonalmente all'intaglio
Rot7	1000	16500	25	Ortogonalmente all'intaglio
Rot8	1000	20000	30	Ortogonalmente all'intaglio

Tabella I: Pianificazione delle prove

L'osservazione dell'avanzamento della cricca è stato effettuato mediante repliche polimeriche, in seguito osservate al microscopio ottico, o direttamente con un microscopio ottico collegato ad un sistema di acquisizione digitale delle immagini. I provini sono stati preparati per le prove di propagazione mediante una precricatura della lunghezza circa di 1 mm a partire dall'intaglio ottenuto per elettroerosione.

RISULTATI

Le prove per il modo II hanno mostrato un comportamento atipico, rispetto alle normali modalità di propagazione, ovvero, anziché procedere con un incremento della velocità di propagazione, la cricca, dopo una rapida crescita iniziale in modo II, riferibile in generale ai primi *100 cicli*, rallenta fino ad arrestarsi [4,5,7] dando luogo a ramificazioni inclinate di circa 70° rispetto all'asse della cricca e a fenomeni più o meno marcati di danneggiamento, visibili per la comparsa di numerose frastagliature sulla superficie liscia del provino.

Considerando ad esempio la prova ROT6 ($\Delta K = 20$ MPa \sqrt{m}) la sequenza della propagazione delle fratture in modo II è mostrata in Fig. 4. Si può vedere come dopo una prima propagazione all'incirca coplanare e molto rapida (all'incirca 200 μm in un centinaio di cicli), si poi ha la nascita di una seconda frattura in una posizione arretrata con un lento accrescimento coplanare dei due apici della frattura per circa 2000 cicli. Si può notare come l'avanzamento coplanare della frattura sia 'preceduto' da una zona di danneggiamento meccanico, che osservato a maggiori ingrandimenti risulta essere costituito da una serie di microcricche. Successivamente la cricca tende a deviare da uno dei due apici con un evidente '*branching*'.

In termini di velocità di propagazione la cricca, dopo la rapida crescita iniziale, tende a decelerare bruscamente, probabilmente per effetto dei fenomeni meccanici (biforcazione, cricatura diffusa) che tendono a ridurre il ΔK_{II} all'apice della frattura (Fig. 5). Si ha una propagazione continua solo se si considera l'accrescimento del fronte di materiale danneggiato davanti all'apice.

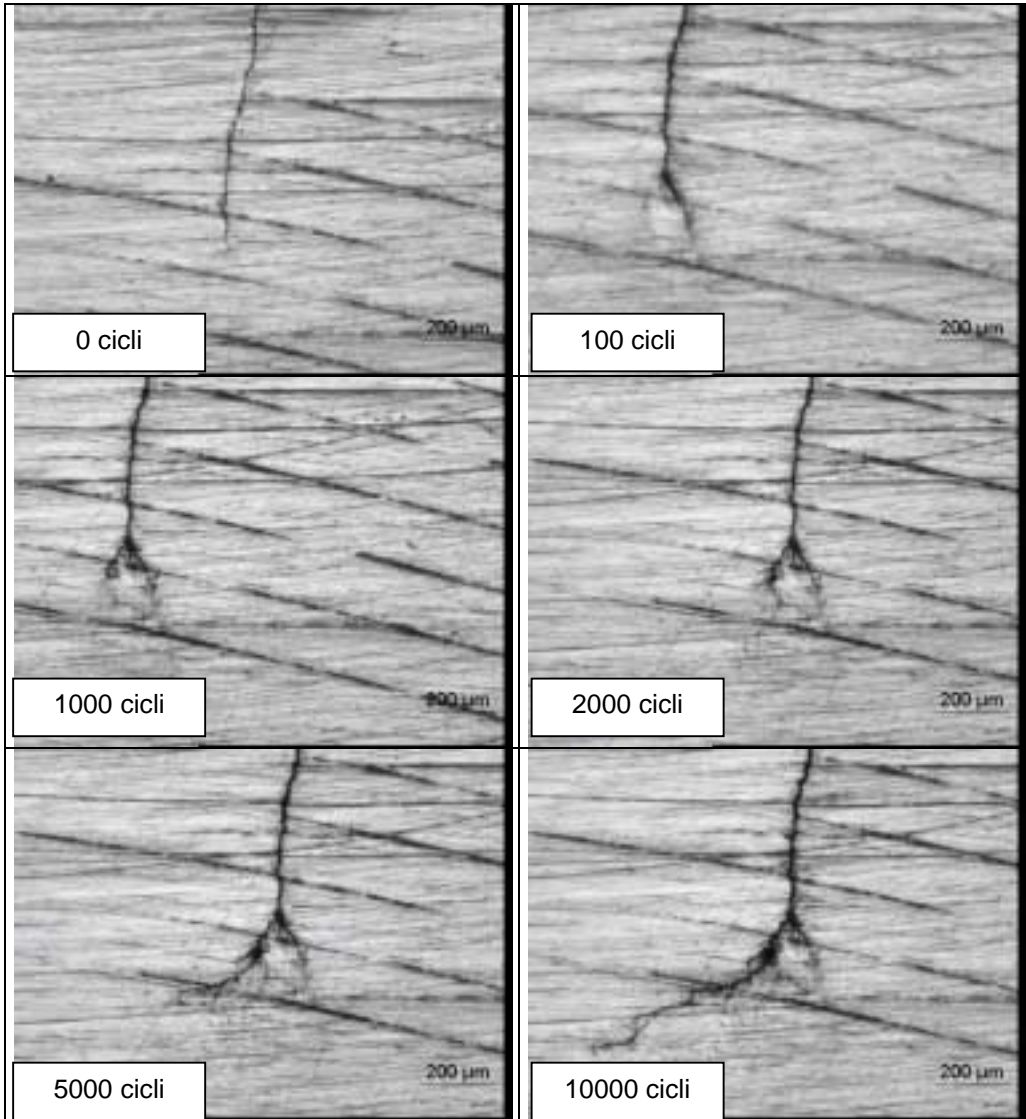


Figura 4: Sequenza propagazione della frattura per provino ROT6 ($\Delta K = 20 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$).

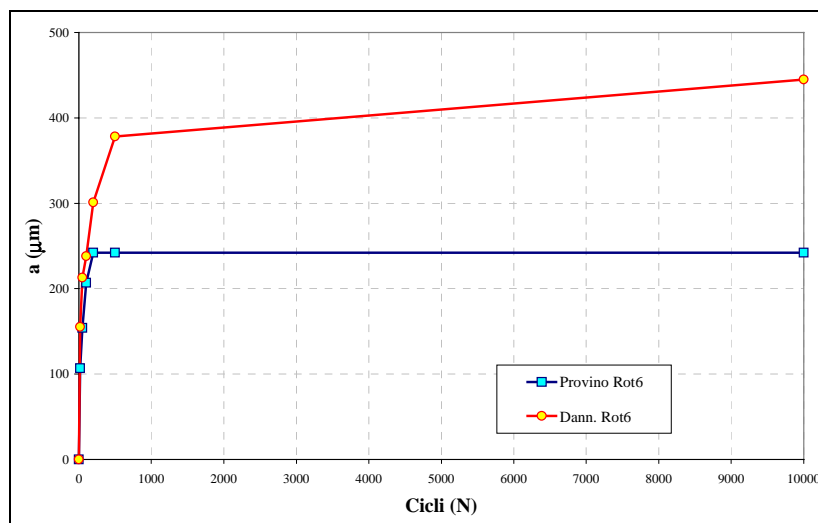


Figura 5: Avanzamento della frattura per provino ROT6 ($\Delta K = 20 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$).

Solo dopo la deviazione la cricca tende a procedere con una velocità di accrescimento crescente. E' molto interessante analizzare tali fenomeni insieme con la curva di propagazione in modo I del materiale (Fig. 6). Si può infatti vedere come la velocità decresca fino all'incontrare la curva della propagazione in modo I: il 'branching' sembra quindi verificarsi quando la velocità di propagazione in modo I, a pari ΔK , risulta più veloce.

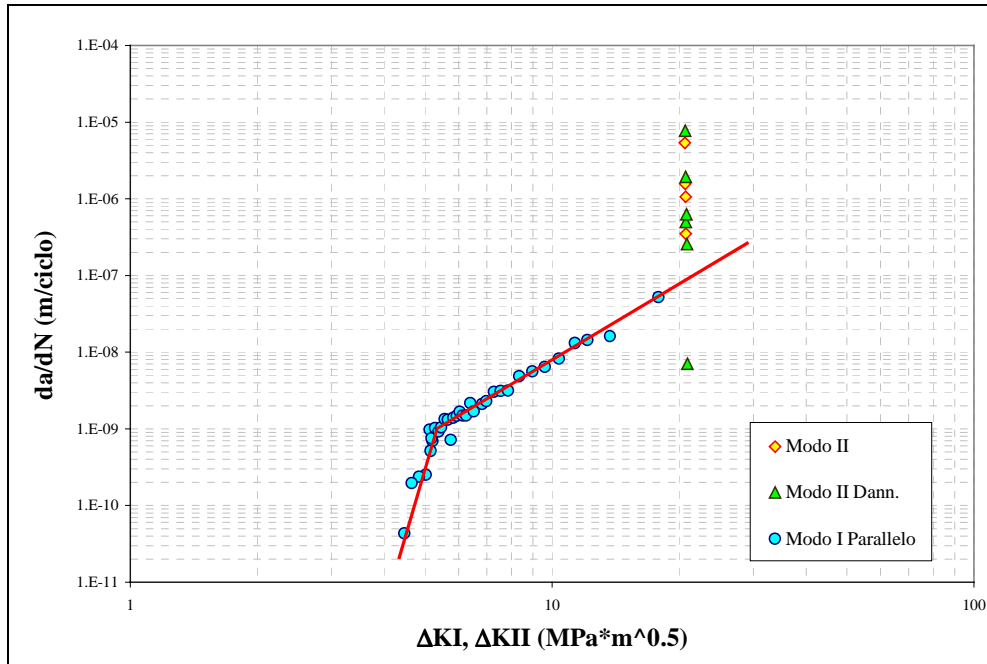


Figura 6: Velocità di propagazione per il provino ROT6

Osservando gli andamenti delle fratture per tutti i provini testati è inoltre possibile notare che:

- l'entità del danneggiamento all'apice della frattura propagante è funzione del ΔK_{II} applicato: in particolare nel provino ROT8 ($\Delta K_{II}=30 MPa\sqrt{m}$), riportato in Fig. 7, l'entità del danneggiamento è molto maggiore rispetto al provino ROT6 testato a $20 MPa\sqrt{m}$;
- ad un prefissato ΔK , la velocità iniziale di propagazione in modo II è anche due ordini di grandezza superiore alla corrispondente velocità in modo I;
- la velocità di propagazione in modo II tende comunque a decrescere fin quando non tende a diventare inferiore della corrispondente propagazione in modo I;
- ai ΔK_{II} più bassi le fratture propagano in modo coplanare per lunghezze intorno ai $50 \mu m$, per poi dare origine ad un branching netto formante un angolo di circa 70° con la direzione della cricca (Fig. 8);
- l'angolo di 'branching' tende ad essere vicino a 70° , ovvero la direzione cui teoricamente corrisponde il massimo $K_{\theta\theta}$ [9].

Dal punto di vista pratico le considerazioni precedenti indicano come il diagramma $da/dN-\Delta K_{II}$ di un dato materiale possa solo essere ottenuto come sovrapposizione dei punti da/dN relativi a prove eseguite a ΔK diversi.

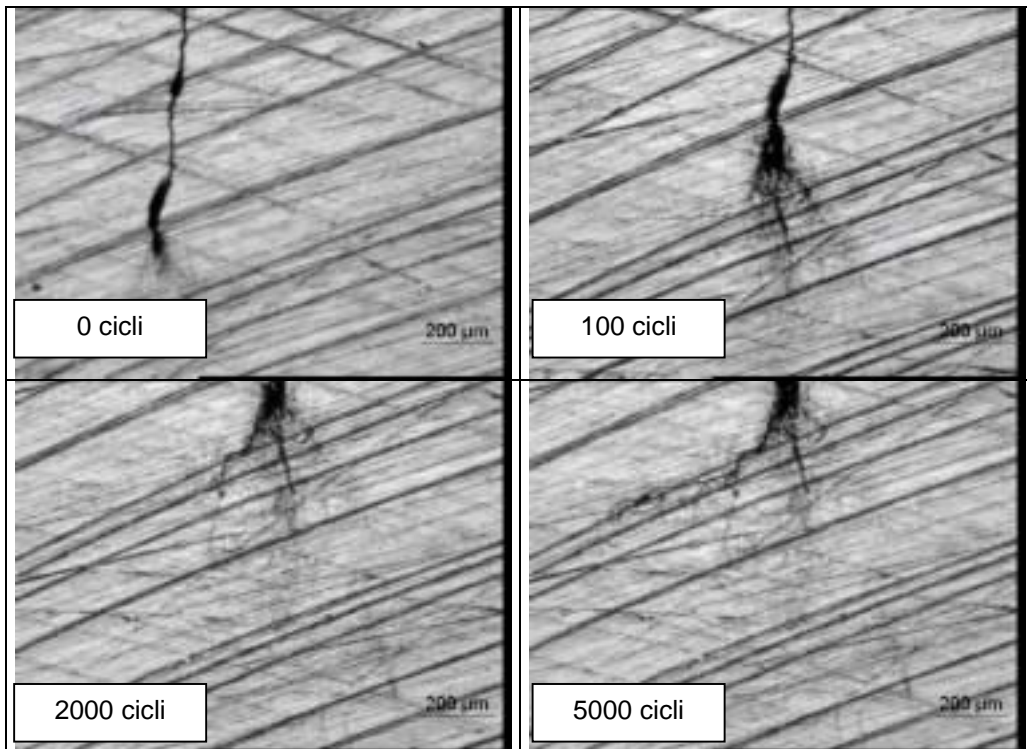


Figura 7: Sequenza propagazione della frattura per provino ROT8 ($\Delta K_{II} = 30 \text{ MPa}\sqrt{m}$)

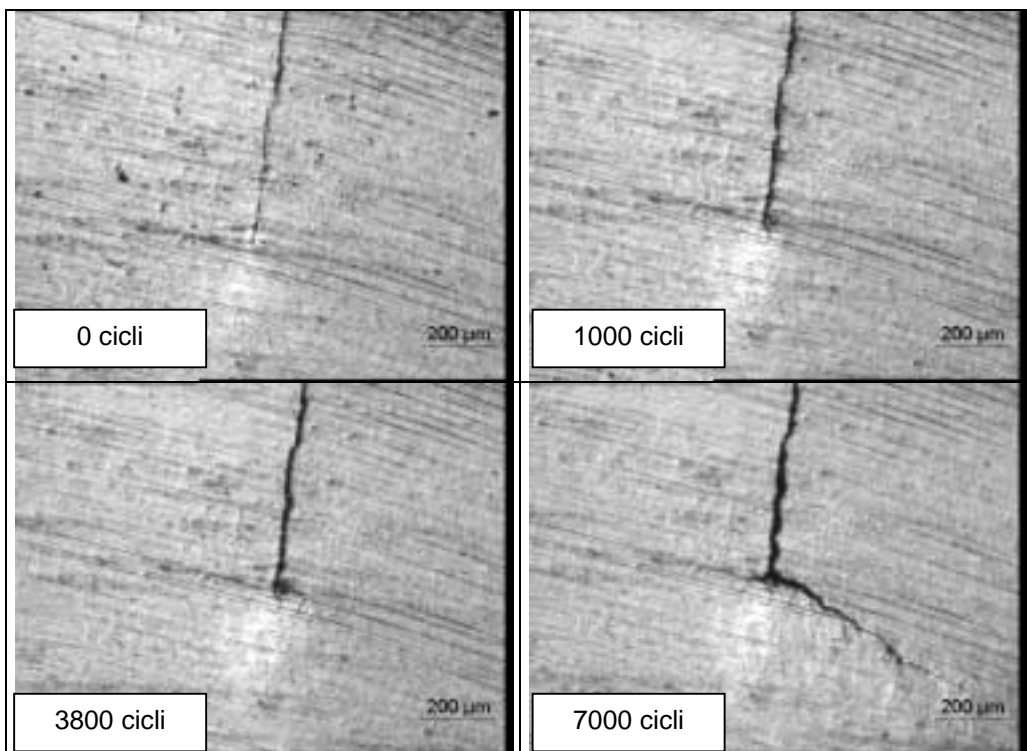


Figura 8: Sequenza propagazione della frattura per provino ROT4 ($\Delta K_{II} = 15 \text{ MPa}\sqrt{m}$)

Inoltre i risultati ottenuti, in accordo con quanto già discusso in [7], mostrano come investigare la soglia di propagazione in modo II sia estremamente difficile con provini

come CTS e ‘four-point bending’ nei quali la cricca non è ‘confinata’, come risulta invece nel dispositivo ideato da Murakami, poiché quando la cricca rallenta (essendo $\Delta K_{II,TH} > \Delta K_{I,TH}$ [2-3]) essa tende immediatamente a deflettere nella direzione con $K_{\theta\theta}$ massimo ed a propagare in modo I, in preferenza a partire da branch sviluppati in posizione arretrata rispetto all’apice effettivo della cricca [10].

CONCLUSIONI

La propagazione di fratture in modo II è il meccanismo che provoca fenomeni di rottura per fatica quali lo ‘spalling’ a partire da microcricche superficiali o difetti nel materiale. E’ quindi estremamente importante conoscere la velocità di propagazione delle fratture per fatica in modo II per i materiali soggetti a fatica da contatto.

Nella presente memoria sono state discussi i risultati di una serie di esperimenti di propagazione di fratture per modo II in un acciaio per rotaie mediante un dispositivo ‘four-point bending’. I risultati mostrano che la propagazione in modo II si manifesta, con velocità decrescente, solo per alcune centinaia di μm : quando la velocità di propagazione è vicina a quella in modo I, le cricche deflettono nella direzione di massimo $K_{\theta\theta}$.

BIBLIOGRAFIA

1. Lunden R., “Cracks in railway wheels under rolling contact load”, Proc. Int. Wheelset Congress 1992, pp. 163-167.
2. Murakami Y., Sakae C., Hamada S., “Mechanism of Rolling Contact Fatigue and Measurement of $\Delta K_{II,th}$ for Steels”, Engineering Against Fatigue (Beynon et al. Eds.) 1999, Balkema, Rotterdam.
3. Murakami Y., Hamada S., “A new method for the measurement of mode II fatigue threshold stress intensity factor range $\Delta K_{II,th}$ ”, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 1997, 20, 863-870.
4. Otsuka A., Sugawara H., Shomura M., “A test method for mode II fatigue crack growth relating to a model for rolling contact fatigue”, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 1996, 19, 1265-1275.
5. Gao H., Brown M., Miller K.J., “Mixed-mode fatigue thresholds”, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 1982, 5, 1-17.
6. Bold P.E., Brown M., Allen R.J., “Shear mode crack growth and rolling contact fatigue”, Wear 1991, 144, 307-317.
7. Pinna C., Doquet V., “The preferred fatigue crack propagation mode in a M250 maraging steel”, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 1999, 22, 173-183.
8. ASTM E647-2000, “Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates”, ASTM.
9. Pook L.P., “The significance of mode I branch cracks for mixed mode fatigue cracks growth threshold behaviour”, in Biaxial and Multiaxial Fatigue (Brown & Miller Eds.) 1989, MEP.
10. Doquet V., Frelat J., “Branch crack development from the flank of a fatigue crack propagating in mode II”, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 2001, 24, 207-214.

RINGRAZIAMENTI

La ricerca si è svolta nell’ambito di un Progetto di Ricerca (co-finanziamento MIUR MM09163357_001) coordinata dal Prof. F. Cheli (Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica) avente per tema “Danneggiamento nel contatto ruota-rotaia per effetto dei carichi dinamici”. Si ringrazia il Gruppo Lucchini, in particolare l’Ing. Mariano Scepi, per la cortese fornitura di rotaie.