

UN MODELLO FENOMENOLOGICO PER LA PREVISIONE DELLA COMPETIZIONE TRA USURA E RCF NEL CONTATTO CICLICO TRA RUOTA E ROTAIA

G. Donzella^a, A. Mazzù^a, C. Petrogalli^a

^a*Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale, Università degli Studi di Brescia, via Branze, 38
25123 Brescia, e-mail: Giorgio.donzella@ing.unibs.it*

SOMMARIO

Il problema della competizione tra fatica ed usura negli acciai per ruote e rotaie ferroviarie è stato studiato attraverso prove sperimentali su banco bi – disk, in regime di rotolamento con strisciamento a secco. Le prove sono state eseguite tutte nella stessa condizione di lavoro, ma con durate diverse, in modo da studiare l'evoluzione del danneggiamento. È stata osservata la formazione per ratchetting di cricche superficiali, che si mantengono di profondità pressoché costante all'aumentare del numero di cicli; l'usura interviene rimuovendo materiale dalla superficie, esponendo così al ratchetting strati sottostanti inizialmente in regime di shakedown elastico. In conclusione, si propone un modello di calcolo per prevedere i fenomeni di danneggiamento in diverse condizioni di esercizio.

ABSTRACT

The problem of competition between fatigue and wear in steels for railway rails and wheels was studied by experimental tests on a bi – disk bench, in rolling – sliding dry contact. The tests were all carried out in the same condition, but with different duration, in order to study the damage evolution. Formation of surface cracks due to ratchetting, of almost constant depth with increasing cycle number, was observed; wear affects this phenomenon by removing material from the surface, and exposing to ratchetting deeper layers that are initially in elastic shakedown regime. In conclusion, a model for predicting the damage phenomena in different operating conditions was proposed.

1. INTRODUZIONE

Il problema della competizione tra fatica da contatto ciclico di rotolamento (RCF) ed usura ha recentemente assunto molta rilevanza nella ricerca sul contatto tra ruota e rotaia, per le sue implicazioni nell'integrità strutturale e nei piani di manutenzione di tali componenti [1-5].

Le cricche da RCF possono originarsi sia per fatica oligociclica (LCF), sia per ratchetting [6], a seconda di quale meccanismo sia più veloce, a condizione che il limite di shakedown elastico sia superato; tuttavia il ratchetting implica anche una plasticizzazione incrementale unidirezionale, che è tipica del contatto da rotolamento con strisciamento.

Il ratchetting è in effetti la causa principale della formazione di cricche all'interfaccia ruota – rotaia [3], che compaiono quando il materiale esaurisce la sua duttilità, cioè quando si raggiunge un valore critico della deformazione plastica accumulata [7]. Queste cricche possono propagare per un breve tratto parallelamente alla superficie, determinando così un continuo distacco di scaglie (fenomeno noto come delaminazione [8]); oppure possono crescere verso il cuore, nel qual caso sono propriamente chiamate cricche di RCF [9]. Tuttavia, l'usura può essere anche concomitante con cicche di RCF profonde [1,10].

L'usura e la RCF sono inoltre in competizione fra loro [9, 11], poiché l'usura rimuove continuamente gli strati superficiali in cui nucleano le cricche, spesso impedendo danneggiamenti più severi.

L'importanza dell'usura nell'impedire la propagazione di cricche da RCF è dimostrata ad esempio dall'uso della riprofilatura come strumento per la manutenzione delle rotaie [1, 12, 13].

Lo studio della competizione tra usura e RCF è tuttavia molto complesso, poiché coinvolge molti fenomeni a volte accoppiati, come la formazione di sforzi residui, l'incrudimento del materiale, l'esaurimento della duttilità e, specialmente nel contatto con acqua, la propagazione delle cricche indotta dalla pressurizzazione del liquido intrappolato al loro interno. A causa di queste difficoltà, a fronte di molte ricerche sperimentali e modelli elaborati per descrivere l'evoluzione del fenomeno del ratchetting negli acciai per ruote e rotaie [14-20], esistono solo pochi contributi finalizzati a spiegare nel dettaglio come usura e RCF interagiscano ed evolvano [21-23].

In particolare, Tyfour et al. [21], tramite prove bi – disk su acciaio BS11 ad una pressione di contatto di 1500 MPa ed uno strisciamento relativo dell'1% (condizioni molto severe utilizzate per amplificare i fenomeni di danneggiamento), hanno evidenziato che l'usura, il ratchetting e l'incrudimento del materiale sono fenomeni correlati, che diventano stazionari dopo un transitorio iniziale. Fletcher e Beynon [22], nelle stesse condizioni di prova, hanno osservato un equilibrio tra la velocità di crescita delle cricche e la velocità di usura. La crescita delle cricche è descritta come la sequenza di due meccanismi: nucleazione della cricca per ratchetting, seguita da propagazione sotto sforzi di scorrimento.

In questo lavoro sono presentati i risultati di una serie di prove di contatto ciclico su provini cilindrici, realizzati in materiali tipici per ruote e rotaie, in condizioni di rotolamento con strisciamento a secco. Analogamente ai test di Tyfour [21] e Fletcher [22], le prove sono state eseguite con lo scopo principale di studiare se viene raggiunto uno stato stazionario del danneggiamento, ma con livelli di pressione e slittamento inferiori, a fronte di una durata molto più lunga, come avviene nelle normali condizioni di esercizio. Questo studio ha anche lo scopo di verificare per una durata elevata i risultati delle ricerche di Suh e Clayton [17], che osservarono la tendenza ad un comportamento asintotico delle deformazioni da ratchetting in funzione del numero di cicli.

Obiettivo finale della ricerca in corso è l'elaborazione di un modello di calcolo utilizzabile per la previsione del danneggiamento sui componenti full scale e per la pianificazione delle relative manutenzioni in esercizio.

2. PROVE SPERIMENTALI

2.1 Materiali e campioni

Le prove di contatto ciclico sono state eseguite su provini cilindrici di diametro 60 mm e spessore 10 mm, realizzati in acciaio UIC R7T per la ruota, e UIC 900A per la rotaia; la composizione chimica e le proprietà meccaniche di questi materiali sono riportati nelle Tab. 1 e 2. Il comportamento ciclico dei materiali è stato caratterizzato con prove di fatica oligociclica. Il limite di snervamento ciclico ($R_{P0,2}$) è stato successivamente utilizzato per costruire le mappe di shakedown di questi acciai.

Tabella 1 – Composizione chimica degli acciai usati nelle prove

Steel	C	S	P	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Si	Al	V
900A Rotaia	0.71	0.018	0.024	1.1	<0.3	<0.3	0.013	0.009	0.3	0.004	0.002
R7T Ruota	0.51	0.003	0.005	0.76	0.13	0.07	0.01	0.10	0.36	0.027	0.002

Tabella 2 – Proprietà meccaniche nominali degli acciai usati nelle prove

Acciaio	Limite di snervamento [MPa]	Limite di rottura [MPa]	Allungamento percentuale [%]	Strizione percentuale [%]	Durezza [HV]	$R_{P0,2}$ ciclico [MPa]
900A – Rotaia	500	935	16	39	300	480
R7T – Ruota	420	732	21	45	260	540

2.2 Strumentazione e procedura di prova

Le prove sono state condotte su di un banco prova di tipo bi-disk progettato e costruito presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale dell'Università di Brescia, il cui schema è riportato in Fig. 1. La macchina è dotata di due mandrini, uno dei quali traslante su guide lineari, guidati

indipendentemente da due motori da 33kW. Il movimento di avvicinamento e l'applicazione del carico di contatto sono ottenuti per mezzo di un attuttore servo – idraulico [24].

La macchina è anche equipaggiata con una video camera lineare in grado di scannerizzare la superficie dei provini durante il test, la cui immagine complessiva può essere ricostruita mediante software. L'elaborazione delle immagini delle superfici di contatto permette di apprezzare visualmente la tipologia del danneggiamento e di quantificare la sua velocità.

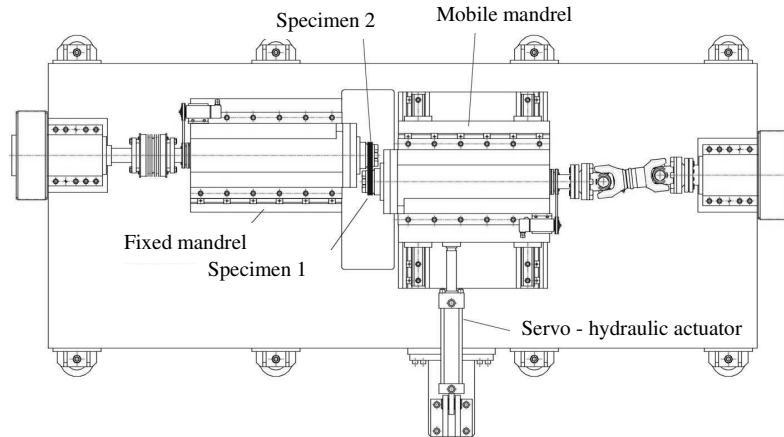


Fig. 1 – Banco prova bi-disk dell'Università di Brescia

Sono state provate dieci coppie di provini nelle stesse condizioni, ma con diverse durate, da 10^5 fino a 10^6 cicli, con un incremento progressivo della durata di 10^5 cicli.

I provini rotaia sono stati montati come followers ed i provini ruota come drivers.

I parametri delle prove erano i seguenti:

- pressione di contatto di Hertz (p_0): 1100 MPa;
- strisciamento relativo (s), definito come il rapporto fra la velocità di strisciamento e la velocità media di rotolamento: 0.06%;
- lubrificazione: a secco (raffreddamento ad aria);
- velocità media di rotolamento: 500 giri/';

Per ogni provino, è stata seguita la seguente procedura di monitoraggio:

- la prova è stata periodicamente fermata per analizzare e registrare l'aspetto della superficie con la video – camera, e per misurare l'usura in termini di perdita di peso con una bilancia di precisione (con la risoluzione di 0.01 g);
- alla fine della prova, la superficie di contatto è stata analizzata con un microscopio ottico; inoltre, alcune sezioni diametrali sono state lucidate ed esaminate al microscopio ottico per rilevare la presenza di cricche da RCF, mentre altre sono state attaccate con Nital ed osservate al microscopio elettronico per rilevare i flussi plastici. Da ultimo, sono state eseguite misure di microdurezza sulle sezioni dei provini a diverse profondità.

2.3 Risultati delle prove

La velocità d'usura è riportata in Fig. 2 in termini di spessore rimosso in funzione del numero di cicli N .

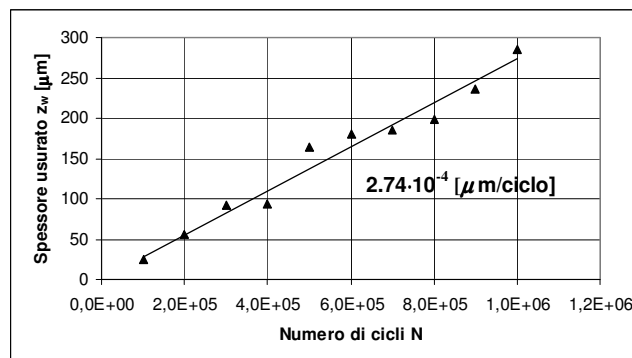


Fig. 2 – Velocità di usura: punti sperimentali ed approssimazione lineare

Da questo grafico si deduce che questo parametro ha un andamento pressoché lineare, con un valore medio della velocità di usura di $2.74 \times 10^{-4} \mu\text{m}/\text{ciclo}$, ottenuto mediante regressione lineare dei risultati sperimentali.

La superficie di contatto mostra fenomeni di “flaking” diffuso, come mostrato in Fig. 3.a; la percentuale di area danneggiata evolve fino a 2×10^5 cicli, per poi stabilizzarsi, come mostrato in Fig. 3.b. Anche in sezione la morfologia delle cricche non cambia significativamente con il numero di cicli: le cricche nucleano dalla superficie, propagando con un’inclinazione media di 5° da questa, come mostrato in Fig. 4.a. In ogni provino sono stati osservati flussi plastici significativi, che seguono linee curve come è evidente in Fig. 4.b. La profondità media delle cricche per diversi numeri di cicli è stata misurata e riportata in Fig. 5.a, con un valore che varia tra 15 e $20 \mu\text{m}$. Anche in questo caso è stato osservato un andamento pressoché costante, dopo una piccola evoluzione durante i primi 2×10^5 cicli. Le cricche propagano seguendo i flussi plastici, come mostrato in Fig. 5.b.

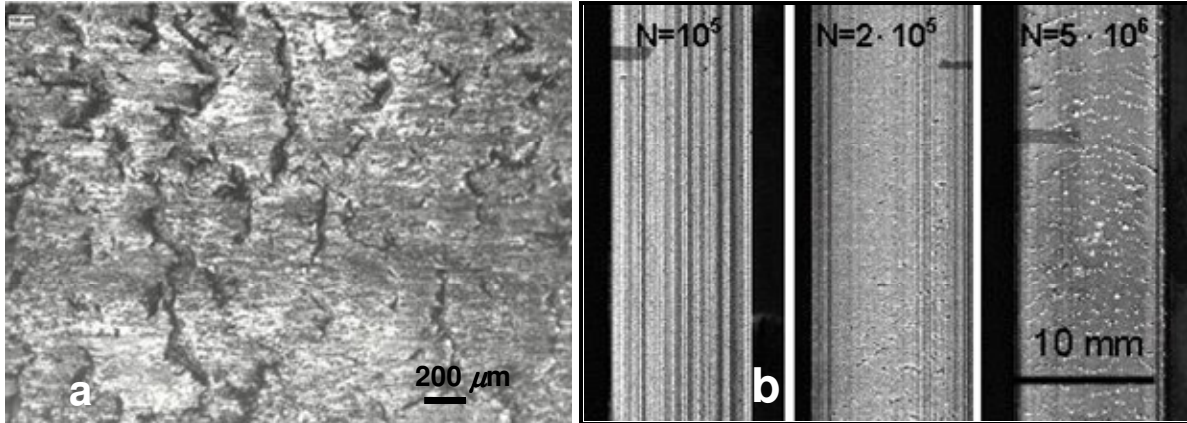


Fig. 3.a – Flaking sulla superficie di contatto; 3.b – Evoluzione del danneggiamento

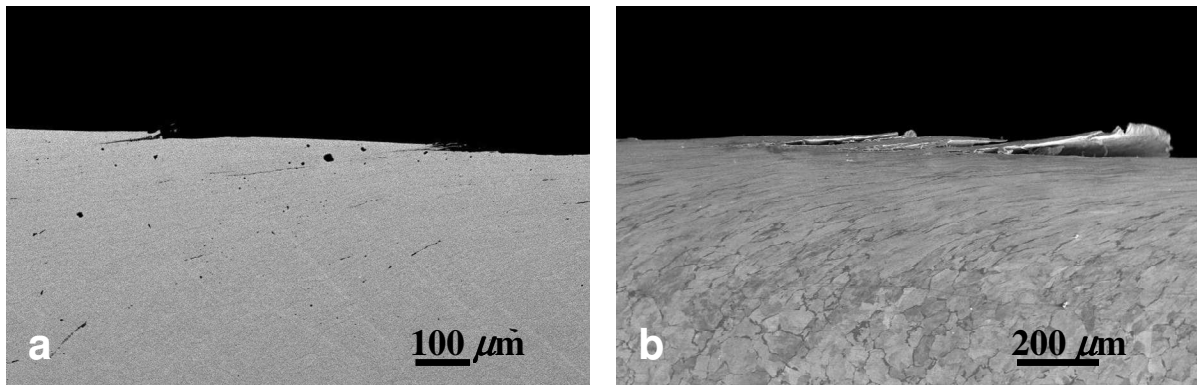


Fig. 4.a – Sezione di cricche superficiali; 4.b – Flussi plastici sottosuperficiali

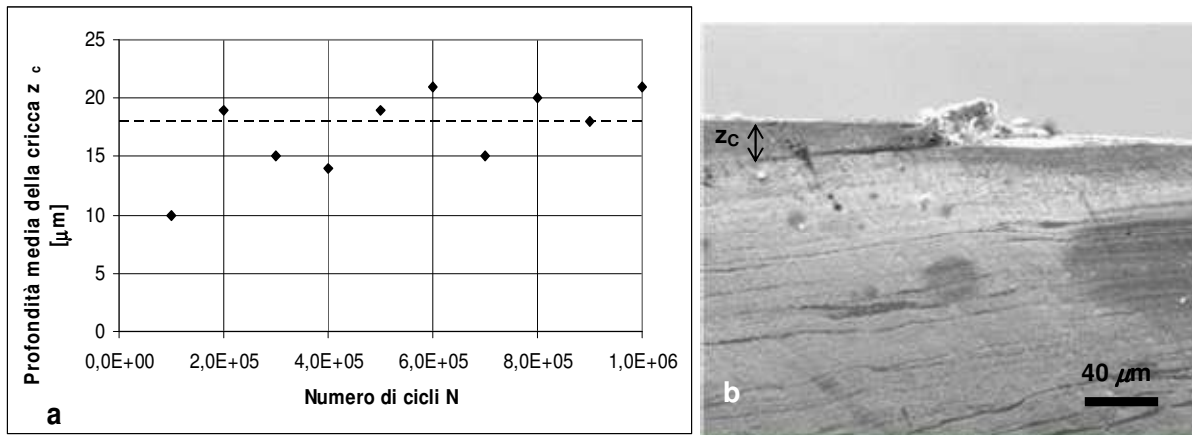


Fig. 5.a – Profondità delle cricche di fatica in funzione del numero di cicli; 5.b – Corrispondenza fra flussi plastici e direzione delle cricche

Per ogni provino è stata inoltre misurata l'orientazione γ_{ct} delle linee di flusso plastico alla profondità degli apici delle cricche di fatica (vedi Fig. 6.a); come mostrato in Fig. 6.b, l'angolo γ_{ct} varia da circa 1.4 a 1.56 radianti.

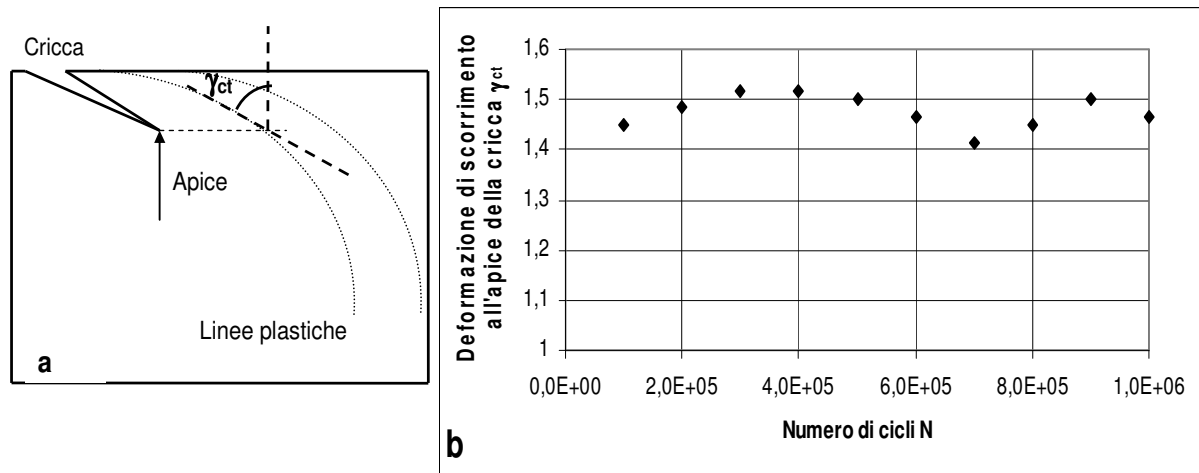


Fig. 6.a – Definizione dell'angolo γ_{ct} ; 6.b – Variazione di γ_{ct} in funzione del numero di cicli

In Fig. 7.a e 7.b sono riportati rispettivamente i profili di microdurezza e la durezza a 40 μm dalla superficie in funzione del numero di cicli: entrambi indicano un incrudimento progressivo del materiale.

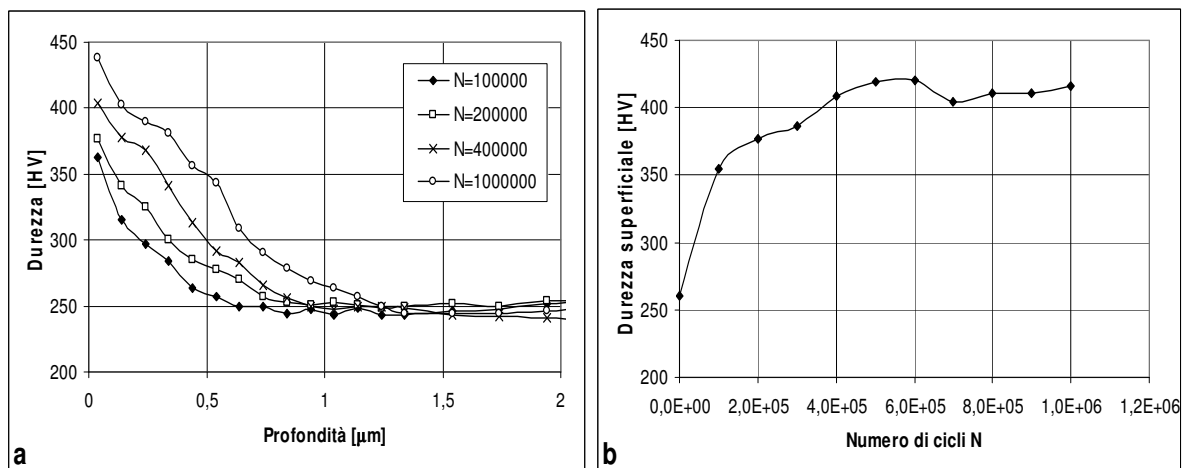


Fig. 7.a – Variazione del profilo di microdurezza al variare del numero di cicli; 7.b – Variazione della durezza a 40 μm di profondità in funzione del numero di cicli

3. DISCUSSIONE

Il fenomeno della RCF si manifesta attraverso la nucleazione di cricche in superficie per esaurimento della duttilità del materiale; il meccanismo è quello del “shear bands cracking”, descritto in [2]. Poiché la profondità della cricca resta approssimativamente costante all'aumentare del numero di cicli, si può dedurre che nello strato superficiale del materiale sia presente una zona di danneggiamento stazionaria: al progredire della rimozione dello strato superficiale per effetto dell'usura, regioni via via più profonde raggiungono la deformazione critica, e la cricca penetra in profondità alla stessa velocità dell'usura, secondo un meccanismo di “crescita stabile”. Questi risultati confermano le evidenze di Fletcher e Beynon [22], Tyfour [21], Suh e Clayton [17], Deters [25], anche per un numero di cicli significativamente più alto.

Questo meccanismo implica che l'apice della cricca si trovi sempre al limite della regione in cui il materiale raggiunge la condizione di esaurimento della duttilità, e la deformazione di scorrimento γ_{ct} misurata alla profondità corrispondente può dunque essere considerata la deformazione critica. Questa considerazione si accorda con quanto ipotizzato in [26], ove la deformazione critica viene definita come il valore asintotico della deformazione plastica cumulata. La profondità corrente

dell'apice della cricca rappresenta dunque il confine fra il cuore del provino, dove γ è minore di γ_{ct} e lo strato superficiale, dove γ è maggiore di γ_{ct} . (vedi Fig. 8)

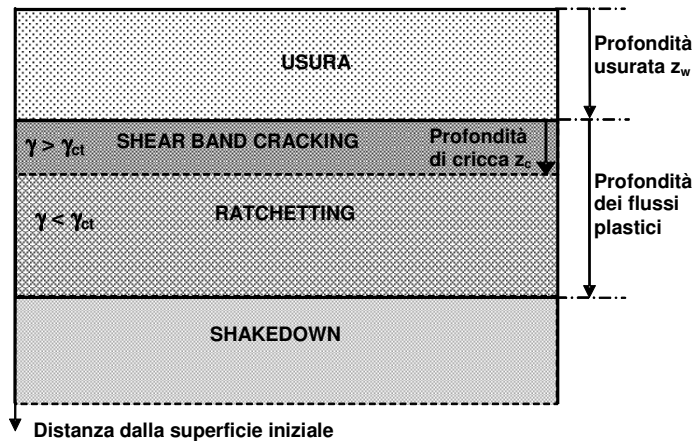


Fig. 8 – Schema del danneggiamento in strati successivi del materiale

In effetti, le deformazioni di scorrimento misurate all'apice della cricca sono dello stesso ordine di grandezza ($\tan(\gamma_{ct}) \approx 10.5$) del risultato asintotico ottenuto da Tyfour sull'acciaio per rotaia BS11 [21]. Sulla base di questo schema è stato formulato un modello per la previsione del danneggiamento, fondato sulle seguenti ipotesi:

- la profondità del materiale asportato per usura corrisponde ad un pari aumento della profondità dell'apice della cricca;
- la velocità di usura è costante;
- la profondità della cricca dipende dall'entità del fenomeno di ratchetting.

A regime, lo spessore danneggiato istantaneo z_D può essere pertanto espresso secondo la (1), cioè come la somma della profondità asportata per usura z_W e la dimensione della cricca in direzione radiale z_C :

$$z_D = z_W + z_C \quad (1)$$

Il fenomeno di usura è stato modellizzato mediante il parametro di Archard K [27], con la trasformazione proposta da Kapoor per prove bi-disk [8] ed ipotizzando, sulla base dei risultati delle prove eseguite, una velocità di usura costante, secondo la (2):

$$z_W = \frac{K\pi p_0 a}{2H} N \quad (2)$$

dove a è la semi-larghezza dell'area di contatto e H è la durezza Vickers del materiale.

Per la previsione della profondità delle cricche si propone un criterio fenomenologico. In particolare, con riferimento alla mappa di shakedown rappresentata in Fig. 9, si assume che essa dipenda dalla differenza $P_r = P_{eff} - P_s$ tra il fattore di carico a regime P_{eff} ed il corrispondente limite di shakedown P_s . La relazione tra queste due grandezze è stata determinata sulla base dei risultati di prove sperimentali, effettuate in passato dagli autori [28] sia su campioni in 900A che in R7T in condizioni di esercizio diverse, i cui punti rappresentativi sono situati nella zona di ratchetting superficiale. Approssimando i risultati sperimentali tramite best fit (vedi Fig 10.a), si è ottenuta la relazione espressa nella (3):

$$z_C = 8.0 P_r^{1.52} [\mu m] \quad (3)$$

In Fig. 10.b è mostrato il confronto fra i dati sperimentali delle presenti prove e la previsione del modello. Questo strumento può essere utilizzato per confrontare fra loro diverse condizioni di esercizio, fornendo una previsione della profondità danneggiata in funzione del numero di cicli e distinguendo in essa il ruolo dell'usura e quello del ratchetting.

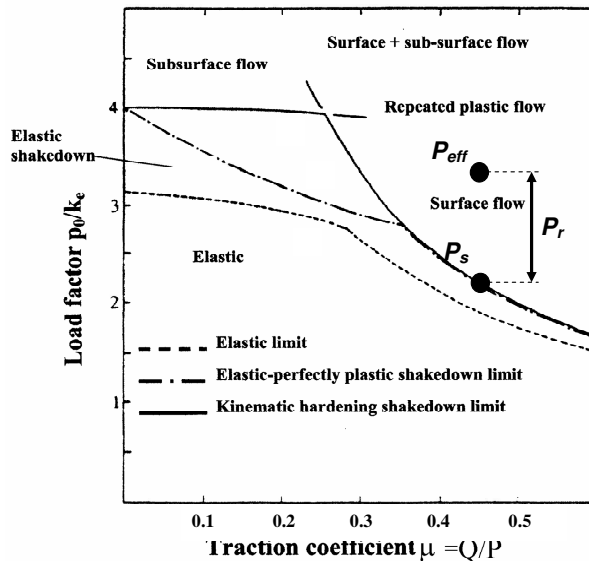


Fig. 9 – Mappa di shakedown per il contatto fra cilindri; k_e = limite di snervamento ciclico a scorrimento

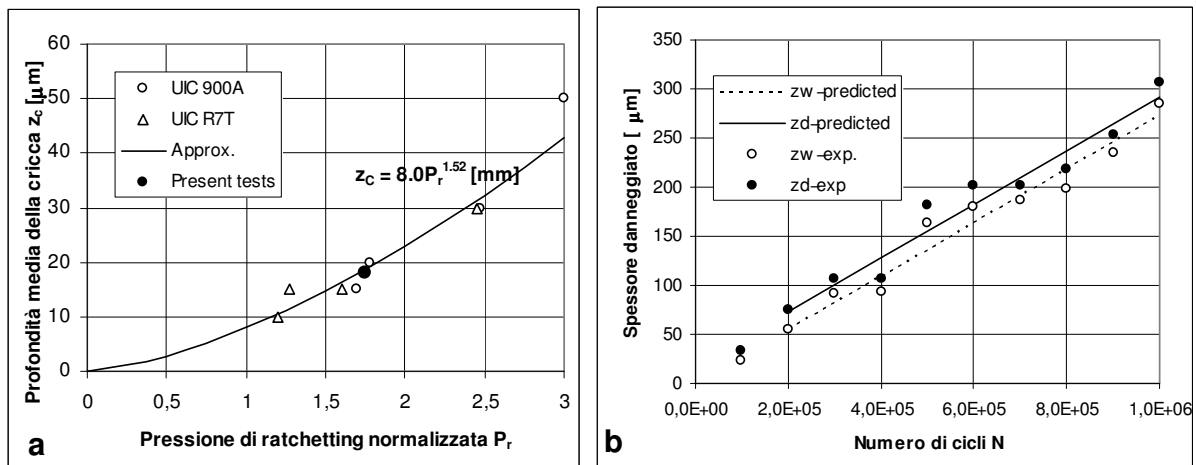


Fig. 10.a – Profondità delle cricche in funzione della pressione di ratchetting normalizzata; 10.b – Confronto fra lo spessore danneggiato sperimentale e quello previsto dal modello

3. CONCLUSIONI

Nelle condizioni di prova illustrate nel presente lavoro, si raggiunge un regime stazionario di competizione tra fatica per contatto ciclico ed usura dopo 2×10^5 cicli, confermando la tendenza ad un comportamento asintotico delle deformazioni da ratchetting in funzione del numero di cicli osservata da Suh e Clayton [21]. Il meccanismo di danneggiamento consiste nella formazione di cricche superficiali per ratchetting, che propagano seguendo i flussi plastici secondo un meccanismo di “shear band cracking”. In altre parole, man mano che l’usura rimuove strati superficiali di materiale, la deformazione plastica critica viene progressivamente raggiunta in strati più profondi, determinando una crescita stabilizzata della cricca.

È stato proposto un modello fenomenologico che permette di valutare i diversi contributi di usura e RCF sull’evoluzione del danneggiamento, in funzione dei materiali accoppiati e delle condizioni di lavoro. Questo modello fornisce un’interpretazione del meccanismo di danneggiamento nel contatto a secco con strisciamento in regime stazionario, e costituisce pertanto un importante punto di partenza per l’elaborazione di un criterio più generale per la valutazione dell’affidabilità strutturale e la programmazione dei piani di manutenzione dei componenti “full scale”.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Grassie S L. Rolling Contact Fatigue on the British Railway System: Treatment. Wear. 2005; 258:1310-1318.

- [2] Su X, Clayton P. Surface Initiated Rolling Contact Fatigue of Pearlitic and Low Carbon Bainitic Steels. *Wear*. 1996; 197:137-144.
- [3] Beynon J H, Garnham J E, Sawley K J. Rolling Contact Fatigue of Three Pearlitic Rail Steels. *Wear*. 1996; 192:94-111.
- [4] Kapoor A. Wear by Plastic Ratchetting. *Wear*. 1997; 212:119-130.
- [5] Johnson K L. Contact Mechanics and the Wear of Metals. *Wear*. 1995; 190:162-170.
- [6] Kapoor A. A Re-evaluation of the Life to Rupture of Ductile Metals by Cyclic Plastic Strain. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 1994; 17:201-219.
- [7] Tyfour W R, Beynon J H, Kapoor A. Deterioration of Rolling Contact Fatigue Life of Pearlitic Rail Due to Dry-Wet Rolling-Sliding Line Contact. *Wear*. 1996; 197:255-265.
- [8] Kapoor A, Franklin F J. Tribological Layers and the Wear of Ductile Materials. *Wear*. 2000; 245: 204-215.
- [9] Ringsberg J W. Shear Mode Growth of Short Surface-Breaking RCF Cracks. *Wear*. 2005; 258:955-963.
- [10] Johnson K L. The Strength of Surfaces in Rolling Contact. *Proc. Instn. Mech. Engrs. Part J*. 1989; 203:151-163.
- [11] Donzella G, Faccoli M, Ghidini A, Mazzù A, Roberti R. The Competitive Role of Wear and RCF in a Rail Steel. *Engineering Fracture Mechanics*. 2005; 72:287-308.
- [12] Grassie S, Nilsson P, Bjurström K, Frick A, Hansson L G. Alleviation of Rolling Contact Fatigue on Sweden's Heavy Haul Railway. *Wear*. 2002; 253:42-53.
- [13] Ishida M, Akama M, Kashiwaya K, Kapoor A. The Current Status of Theory and Practice on Rail Integrity in Japanese Railways – Rolling Contact Fatigue and Corrugations. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2003; 26:909-919.
- [14] Franklin F J, Widiyarta I, Kapoor A. Computer Simulation of Wear and Rolling Contact Fatigue. *Wear*. 2001; 251:949-955.
- [15] Franklin F J, Chung T, Kapoor A. Ratchetting and Fatigue-Led Wear on Rail-Wheel Contact. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2003; 26:949-955.
- [16] Kapoor A, Beynon J H, Fletcher D I, Loo-Morrey M. Computer Simulation of Strain Accumulation and Hardening for Pearlitic Rail Steel Undergoing Repeated Contact. *Journal of Strain Analysis*. 2004; 39:383-396.
- [17] Su X, Clayton P. Ratchetting Strain Experiments with a Pearlitic Steel Under Rolling/Sliding Contact. *Wear*. 1997; 205:137-143.
- [18] McDowell D L. Stress State Dependence of Cyclic Ratchetting Behavior of Two Rail Steels. *International Journal of Plasticity*. 1995; 11:397-421.
- [19] Jiang Y, Sehitoglu H. A Model for Rolling Contact Failure. *Wear*. 1999; 224:38-49.
- [20] Ringsberg J W, Loo – Morrey M, Josefson B L, Kapoor A, Beynon J H. Prediction of Fatigue Crack Initiation for Rolling Contact Fatigue. *International Journal of Fatigue*. 2000; 22:205-215.
- [21] Tyfour W R, Beynon J H, Kapoor A. The Steady State Wear Behaviour of Pearlitic Rail Steel Under Dry Rolling-Sliding Contact Conditions. *Wear*. 1995; 180:79-89.
- [22] Fletcher D I, Beynon J H. Equilibrium of Crack Growth and Wear Rates During Unlubricated Rolling-Sliding Contact of Pearlitic Rail Steel. *Proc. Instn. Mech. Engrs. Part F*. 2000; 214:93-105.
- [23] Donzella G, Faccoli M, Mazzù A, Roberti R. Experimental Investigation on Competition Between Wear and RCF in a Rail Steel. *Proc. 11th International Congress of Fatigue (ICF11)*. Turin. 2005.
- [24] Cambiaghi D, Donzella G, Isceri A. Progetto di un Banco Prova per lo Studio di Fenomeni di Contatto Ciclico. *Il Progettista Industriale*. Novembre 2003.
- [25] Deters L, Engel S, Proksch M. Calculation of Friction in Rolling/Sliding Contacts. *Proc. 5th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2000)*. Tokyo. 2000.
- [26] Ringsberg J W. Life Prediction of Rolling Contact Fatigue Crack Initiation. *International Journal of Fatigue*. 2001; 23:575-586.
- [27] Archard J F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *Journal of Applied Physics*. 1953; 24.
- [28] Donzella G, Mazzù A. Competition Between Wear and RCF at the Wheel – Rail Interface: Some Experimental Evidences on a Rail Steel. *Inviato a Wear*.