

IGF7 - VII Convegno Nazionale
Gruppo Italiano Frattura
Firenze, 13 - 14 giugno 1991

**RESISTENZA A FRETTHING-FATICA:
PROVE MECCANICHE E ANALISI FRATTOGRAFICA**

F. Pratesi, G. Zonfrillo, A. Del Puglia

Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali
Facoltà di Ingegneria, Università di Firenze,
Via S. Marta 3, 50139 Firenze.

SOMMARIO

L'effetto del fretting sulla resistenza a fatica è stato studiato in serie di prove condotte con due diversi dispositivi sperimentali. Sono riportate e discusse le relative curve di Wöhler e le analisi frattografiche delle zone danneggiate dei provini.

Parole chiave: Fretting-fatica, frattografia.

ABSTRACT

The effect of fretting on fatigue strength has been investigated in series of tests with two different experimental devices. In particular, corresponding Wöhler curves and fractographic examinations of damaged surfaces are reported and discussed.

Key words: Fretting-fatigue, fractography.

INTRODUZIONE

Il fretting-fatica si verifica quando, sotto l'azione di un carico oscillante, si ha sfregamento di due superfici a contatto forzato, con movimento relativo dell'ordine delle decine di micron. Il fretting-fatica ha notevole rilievo pratico, verificandosi in comuni realizzazioni ingegneristiche, compresi casi in cui non sono previsti progettualmente movimenti relativi per le superfici a contatto. Esempi tipici sono collegamenti albero-mozzo, chiodature, fili metallici in trefoli, rondelle elastiche, molle a balestra, giunti flangiati [1].

Non esiste ancora una teoria generale in grado di interpretare quantitativamente l'insieme dei fenomeni che si manifestano nel fretting-

fatica [2]. Si ammette in genere che il ruolo del fretting consista nell'accelerare la formazione delle cricche di fatica: la sollecitazione alternata di taglio nell'area di contatto, dovuta all'attrito tra le due superfici, comporta effetti di concentrazione delle tensioni e deformazioni localizzate che portano ad un precoce completamento della fase di nucleazione [3,4]. Conseguentemente si ha una riduzione di vita che a seconda delle condizioni può essere anche consistente.

Il danneggiamento è dovuto ad un fattore meccanico e ad uno chimico [5]. L'azione meccanica si esercita attraverso la formazione di microsaldature negli effettivi punti di contatto tra i due materiali, in seguito alle elevate pressioni locali raggiunte; tali microsaldature vengono ciclicamente rotte dal moto relativo, creando così sia potenziali inneschi di rottura, sia frammenti metallici che, incruditi e ossidati, danno luogo ad un'azione abrasiva sulle superfici di contatto.

L'azione chimica consiste essenzialmente nella formazione di film di ossido su quelle superfici metalliche vergini che, sia sugli elementi a contatto che sui frammenti distaccati, affiorano continuamente a seguito dell'azione meccanica. Naturalmente, il danneggiamento di tipo chimico risulta fortemente dipendente dalle condizioni ambientali: agli effetti dell'ossidazione il normale ambiente di laboratorio o di esercizio è già notevolmente aggressivo. Rispetto a questo, notevoli modifiche di comportamento si possono osservare in ambienti particolari: gas inerti o vuoti spinti tendono ad annullare il danneggiamento chimico, che invece è esaltato da opportune variazioni delle condizioni di umidità, di acidità, ed in genere da aumenti di concentrazione dei composti chimici aggressivi.

E' generalmente riconosciuto che, sotto l'azione delle sollecitazioni tangenziali di attrito dovute al fretting e di quelle applicate esternamente, si formano cricche sulle superfici a contatto in direzione perpendicolare a quella dello scorrimento e dei carichi affaticanti. Le tensioni indotte dall'attrito sono massime ai bordi dell'area superficiale interessata dal fretting e perciò le cricche si formano generalmente in tale regione. Se le condizioni sono tali da non dare luogo a scorrimenti macroscopici, la fessurazione avviene in corrispondenza delle zone estreme delle aree di microscorrimento presenti nella regione di contatto [6]. In caso di sollecitazione monoassiale, le cricche formatesi tendono inizialmente ad accrescersi lungo il piano di taglio massimo, con un angolo di 45° rispetto alla superficie; quando la loro profondità aumenta, la direzione di avanzamento diventa sempre perpendicolare alla tensione principale. Così si ha in genere un primo stadio di estensione variabile in cui la propagazione, finché la cricca attraversa la regione disturbata, è obliqua ed un secondo in cui è normale alla direzione dei carichi applicati.

I fenomeni di fretting-fatica sono già stati indagati sperimentalmente presso il Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali (DMTI); le indagini sono state rivolte sia alla valutazione della resistenza di alcuni materiali [7-9], che all'individuazione di particolari relazioni tra le principali variabili in gioco [10]. In parallelo alle prove sperimentali è stato applicato un modello di previsione di vita basato sul concetto di danneggiamento continuo [11]: assumendo che l'azione danneggiante del fretting sia limitata soltanto alla fase di nucleazione della cricca è stato raggiunto un buon accordo con i dati sperimentali [12].

PROVE MECCANICHE

Per riprodurre in laboratorio le condizioni caratteristiche del fretting-fatica si ricorre frequentemente ad un dispositivo ausiliario montato su un provino sollecitato a fatica [13]; tali dispositivi sono in pratica assai diversi, anche in relazione al particolare sistema in esercizio che si vuol simulare. In assenza di modelli di comportamento meccanico in grado di correlare quantitativamente l'azione del fretting (nelle varie condizioni pratiche) con grandezze e parametri fisici controllati e misurabili, i dati ottenuti con diverse attrezzature di prova si presentano difficilmente confrontabili tra loro.

I risultati sperimentali sulla resistenza a fretting-fatica illustrati nella presente comunicazione sono stati ottenuti utilizzando due diversi dispositivi ausiliari: uno sviluppato presso il BAM di Berlino [14], l'altro appositamente progettato e realizzato presso il DMTI. Per una loro descrizione si rimanda alla bibliografia [9,15].

Un particolare rilievo ha la scelta della forma e del materiale del pattino utilizzato per provocare le condizioni di fretting sul provino. Nelle prove condotte in questa ricerca sono state utilizzate due forme diverse, rispettivamente con l'attrezzatura BAM e DMTI: un cilindro tangente lungo una generatrice ed una forma complessa che termina con un prisma tangente su una superficie rettangolare di altezza 0.5 mm, entrambi agenti sull'intera larghezza del provino - una rappresentazione schematica dei due contatti è riportata in fig. 1. Il primo pattino presenta la caratteristica, almeno per la prima parte della prova, di concentrare l'azione della forza normale su una superficie molto limitata (una linea nell'ipotesi di corpi rigidi); il secondo quella di avere praticamente la stessa geometria di contatto durante tutta la vita del provino.

Per quanto riguarda il materiale, si è scelto in entrambi i casi di fabbricare il pattino con la stessa lega del provino. Questa condizione presenta alcuni vantaggi, quali quello di simulare numerosi casi di interesse pratico e permettere meglio di altre soluzioni la formazione di quelle microsaldature locali che costituiscono uno dei meccanismi fondamentali del danneggiamento da fretting. Nel caso di pattino cilindrico questo comporta durante la prova una geometria variabile della zona di contatto pattino-provino, evitabile utilizzando per il pattino un materiale di durezza molto più elevata rispetto a quella del provino.

Il materiale sul quale sono state condotte le indagini sperimentali è l'acciaio da bonifica 38NCD4K; la composizione percentuale effettiva in peso è riportata in tab. 1.

Tab. 1 - Composizione percentuale del materiale (resto Fe).

C	Al	Si	P	S	Cr	Mn	Ni	Cu	Mo
.39	.02	.31	.012	.028	1.01	.76	.97	.15	.26

Tutte le prove sono state condotte in trazione oscillante con cicli sinusoidali affaticanti di frequenza 10 Hz e tensione media costante di 500 MPa. I risultati, in termini di numero di cicli a rottura, hanno permesso di individuare la resistenza a fatica e quella a fretting-fatica

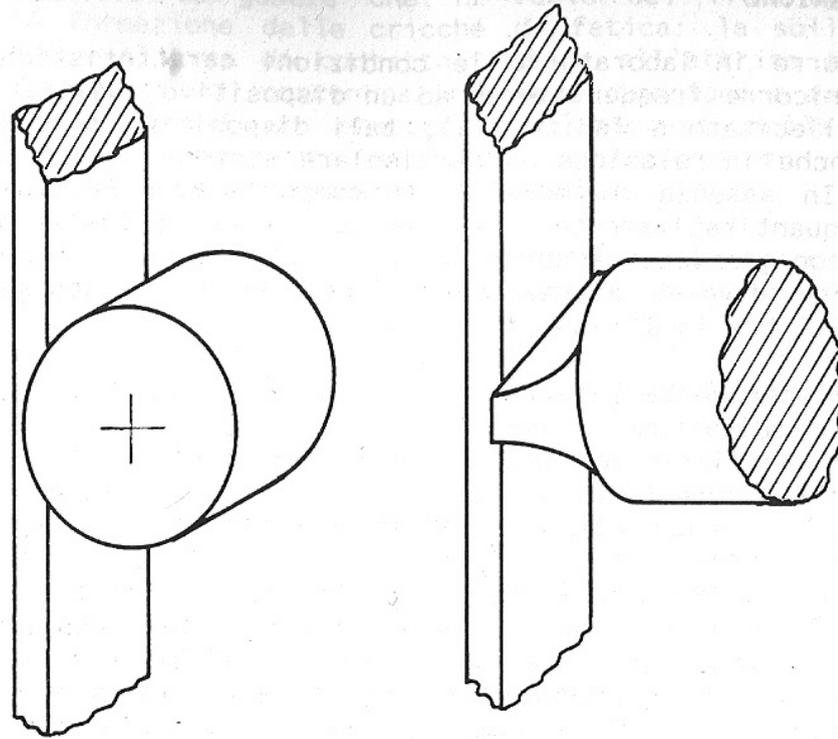


Fig. 1 - Schema delle modalità di contatto dei due pattini sul provino.

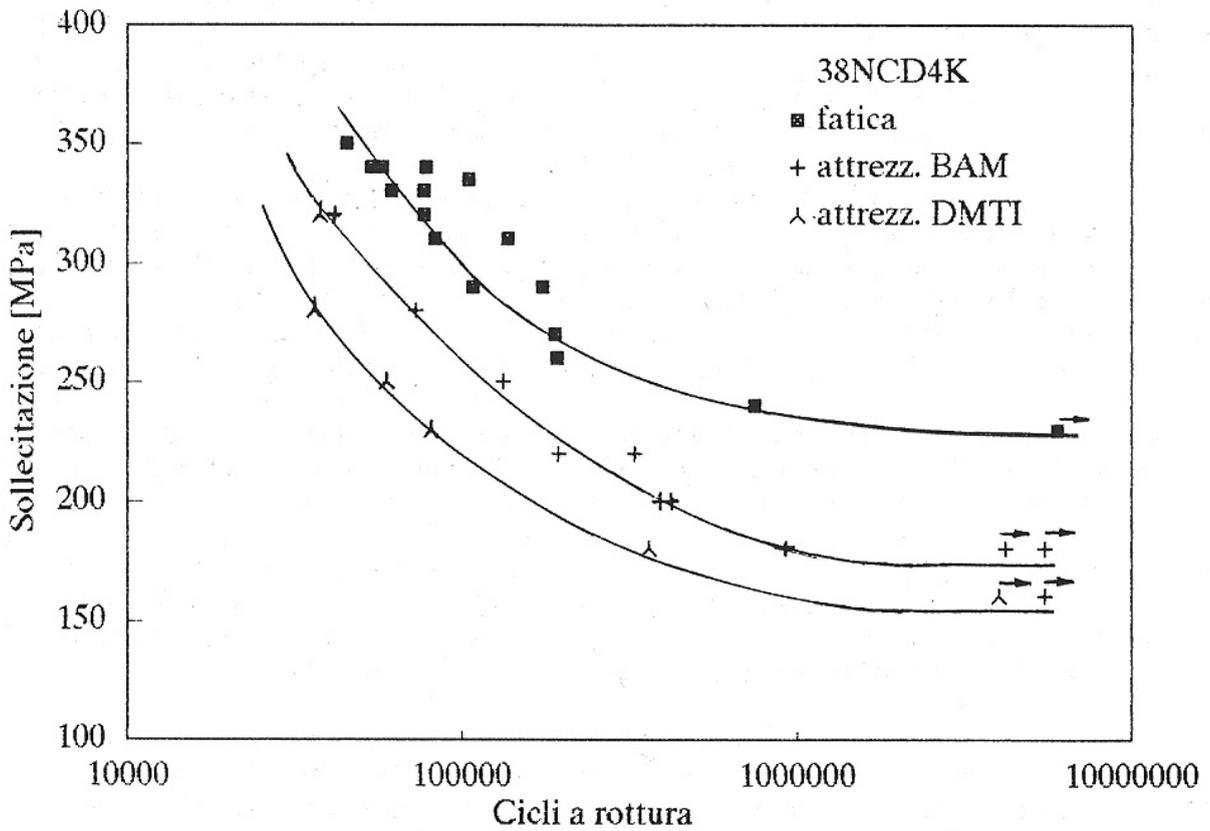


Fig. 2 - Curve di Wöhler di fatica e fretting-fatica.

per un valore prefissato della forza che spinge il pattino sul provino (forza normale), pari a 800 N.

Le curve di Wöhler ottenute sono riportate in fig. 2. La resistenza più elevata si ha logicamente per le prove di fatica pura, con un valore della resistenza indefinita di 230 MPa. Tale curva serve come riferimento per le due curve di fretting-fatica, ottenute con prove effettuate nelle medesime condizioni di quelle di fatica e utilizzando i due dispositivi rispettivamente con pattino cilindrico e prismatico. Come si può notare la diminuzione di resistenza causata dal fretting è più accentuata con pattino prismatico che con pattino cilindrico: quantitativamente la sollecitazione che porta a rottura in un definito numero di cicli si riduce approssimativamente del 25% nel primo caso e del 15% nel secondo.

Per approfondire il confronto dei risultati ottenuti con le due attrezzature, si può cercare di individuare possibili relazioni tra riduzione di vita ed alcuni parametri particolarmente significativi, quali pressione di contatto e scorrimento. Così, mentre con il pattino prismatico si ha una pressione nominale di 200 MPa, per il pattino cilindrico non si può definire univocamente il valore della pressione di contatto: già all'inizio della prova, le deformazioni elastiche di tipo hertziano comportano un'area geometrica di contatto non limitata ad una sola linea [16]; questa superficie cresce al procedere della prova per effetto dell'usura del pattino stesso e provoca una diminuzione della pressione. Qualitativamente, per la geometria cilindrica del pattino la crescita dell'area di contatto è particolarmente significativa nella fase iniziale e successivamente diventa sempre più lenta. Se si assume come valore di riferimento per la pressione di contatto quello valutato misurando l'ampiezza della zona usurata sul pattino a fine prova, si trovano pressioni comprese tra 100 e 300 MPa. Questo indica che la pressione di contatto è generalmente maggiore nel caso di pattino cilindrico, anche in base al fatto che quello considerato è il valore finale della pressione, inferiore rispetto a quello agente nella fase iniziale della prova.

Per quanto riguarda lo scorrimento, si deve notare che, nelle condizioni con cui è stata condotta la sperimentazione, questo dipende in modo diretto dalla rigidità sia dell'attrezzatura utilizzata che del tratto di provino compreso tra la sezione di afferraggio dell'attrezzatura stessa e quella di prova. Essendo diversi i due dispositivi, anche i valori di scorrimento complessivo ottenuti dai rilievi sperimentali risultano diversi e in particolare mediamente superiori di un fattore di circa 1.5 nel caso di pattino piano. Devono essere considerati però anche altri fattori dipendenti in modo meno esplicito dall'attrezzatura, che determinano ad ogni ciclo di carico il legame tra scorrimento e forza di attrito dovuta al contatto. In particolare, agli effetti della riduzione della vita, non possono essere considerati allo stesso modo scorrimenti che avvengono a forza di attrito costante (corrispondente al coefficiente di attrito di distacco) e crescente (con deformazioni plastiche locali degli strati superficiali) [10]; d'altra parte la valutazione dei due contributi separati è problematica.

I valori comparati di pressione e scorrimento ottenuti per le due condizioni sperimentali non giustificano la diversità delle rispettive resistenze. Emerge così ancora più evidente l'influenza determinante delle attrezzature utilizzate e l'esigenza che un confronto affidabile sull'effetto quantitativo della forma del pattino deve essere rimandato a prove effettuate utilizzando una medesima attrezzatura.

D'altra parte le due attrezzature sono state progettate per operare con uno specifico tipo di pattino e l'utilizzazione di pattini di forma diversa richiede alcune sostanziali modifiche. L'applicazione di un pattino cilindrico all'attrezzatura DMTI comporta una complessa lavorazione meccanica del pattino stesso (in quanto la superficie cilindrica dovrebbe essere ricavata alla sua estremità e con le generatrici perpendicolari al suo asse), con onere economico particolarmente gravoso poiché ciascun pattino potrà essere utilizzato per un'unica prova. L'uso di un pattino piano sull'attrezzatura BAM richiede invece una modifica non banale del blocco portapattino per poter garantire l'allineamento e il parallelismo con la superficie del provino.

ANALISI FRATTOGRAFICA

La maggior parte dei provini rotti a fatica e a fretting-fatica è stata successivamente sottoposta ad analisi frattografica utilizzando il microscopio elettronico a scansione Philips 515 del Centro Interdipartimentale MEMA dell'Università di Firenze. In particolare sono state esaminate sia la superficie laterale (per analizzare le caratteristiche del danneggiamento di fretting sulla superficie esterna del campione), sia la superficie di rottura (in modo da ottenere informazioni sulle condizioni del cedimento e sulla propagazione). Le tipologie di frattura e la morfologia dell'area danneggiata si riscontrano con piccole variazioni in tutte le prove condotte con un medesimo pattino.

In assenza di fretting, non si ha ovviamente danneggiamento sulla superficie esterna del provino: in prossimità della rottura la superficie presenta inalterate le tracce della lavorazione meccanica, molto ravvicinate e parallele alla direzione longitudinale del provino. La superficie di frattura si presenta divisa in una zona piatta caratteristica della rottura per fatica ed in una zona frastagliata tipica della rottura statica. Lo studio della propagazione della cricca di fatica permette di risalire al punto di innesco, di solito unico, situato sulla superficie esterna del provino e spesso in prossimità di uno spigolo. A volte l'innesco è centrale e corrispondentemente la zona di propagazione si presenta a forma di conchiglia, fig. 3.

Per i campioni delle prove condotte con il pattino a sezione rettangolare si possono esaminare separatamente le due zone suddette e quella di confine tra loro, con riferimento alle figure 4-8. La superficie esterna del provino presenta in prossimità della rottura una striscia danneggiata che si distingue nettamente dalla zona inferiore che mostra le striature della lavorazione. Nella zona dove si è avuto fretting si notano erosioni più o meno accentuate, dove evidentemente l'asportazione di materiale è avvenuta per scagliatura o fenomeni simili. Di solito, specialmente al margine inferiore, si riscontra la presenza di materiale riportato da zone adiacenti, talora ossidato e finemente triturato.

Nella stessa zona danneggiata dal fretting compaiono alcune fenditure, approssimativamente parallele alla superficie di rottura, che generalmente non hanno raggiunto tra loro un collegamento esteso (visibili in alto a sinistra nella fig. 4, in cui la zona chiara in alto a destra corrisponde alla superficie di rottura). Inoltre, si osservano piccoli frammenti di materiale di tipica forma arrotondata (fig. 5); la microanalisi permette di identificarli come frammenti metallici fortemente ossidati.

superficie di rottura dei provini presenta spesso propagazioni a fatica sotto forma di conchiglie, come quelle in fig. 6. Si hanno differenze fra i campioni nel numero, dimensioni e geometria di questi sistemi di propagazione.

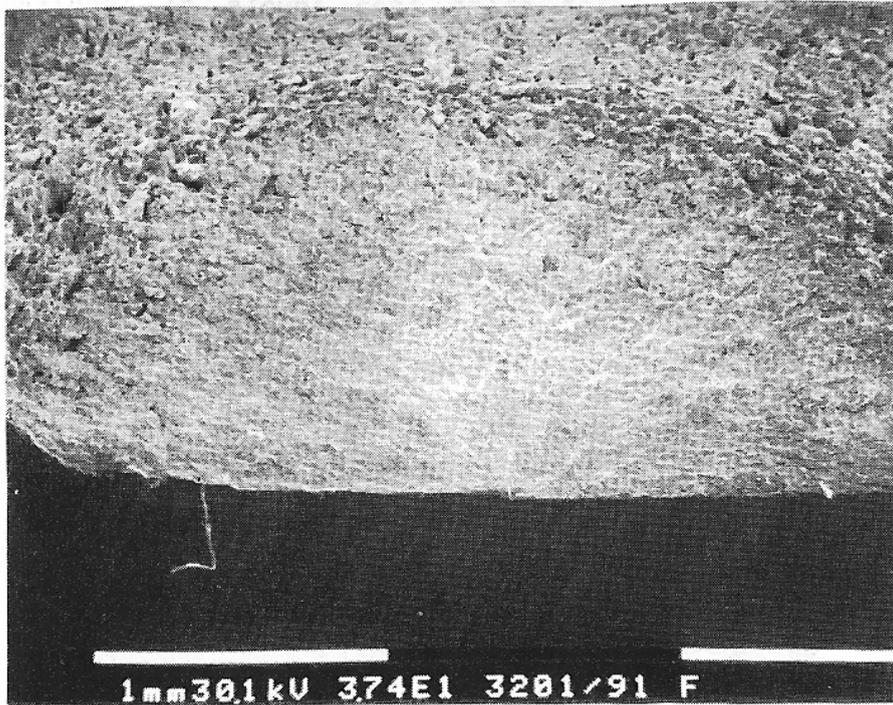


Fig. 3 - Prova di fatica: superficie di frattura.

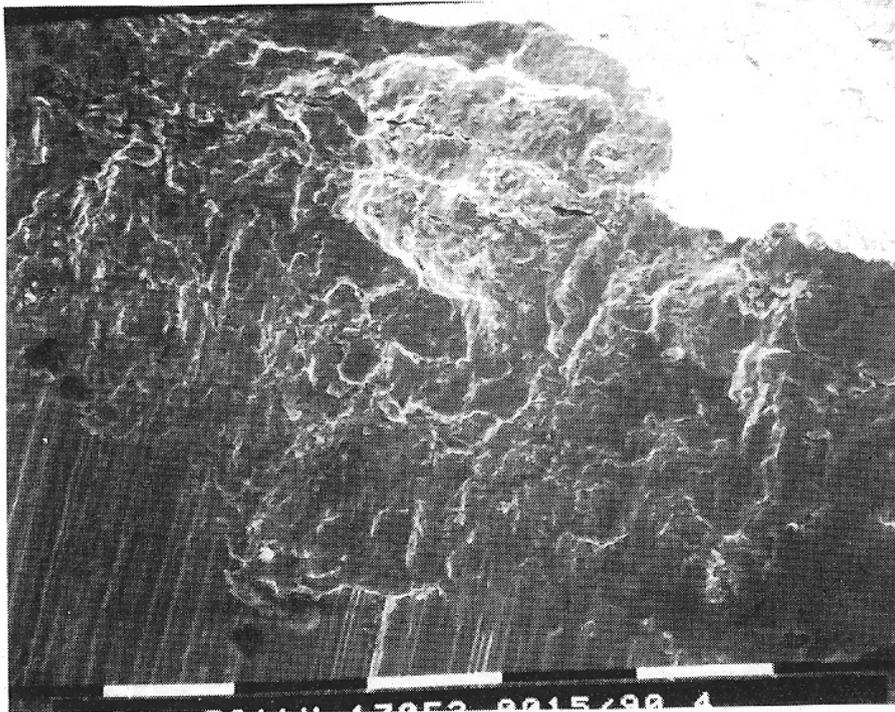


Fig. 4 - Prova di fretting-fatica: superficie laterale.

parte le due attrezzature sono state progettate per operare con un
... di utilizzo di pattini di forma diversa
... modifiche. L'applicazione di un pattino

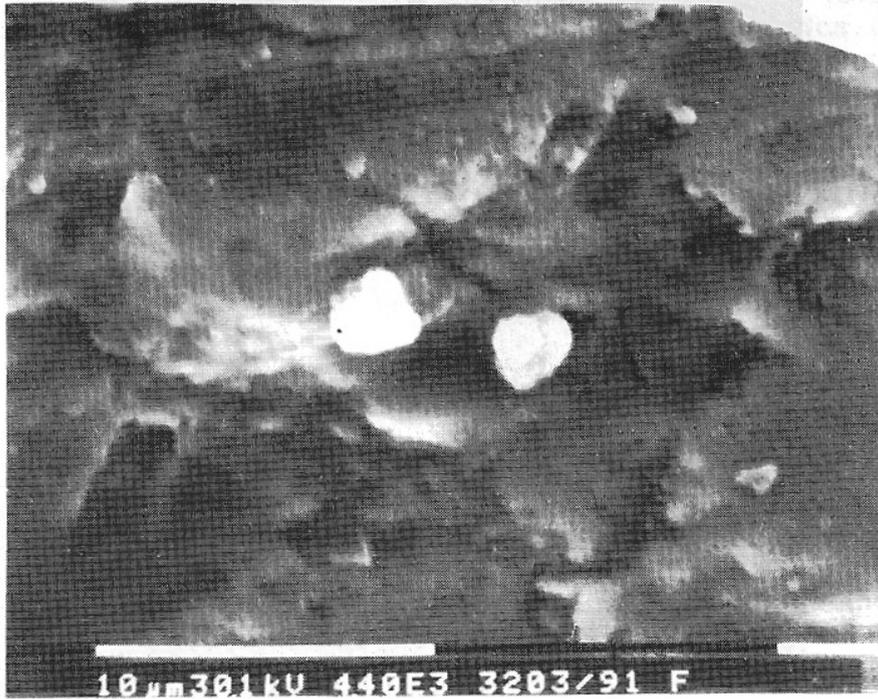


Fig. 5 - Frammenti di materiale ossidato.



Fig. 6 - Prova di fretting-fatica: superficie di frattura.

La superficie di rottura dei provini presenta spesso propagazioni a fatica ad aspetto di conchiglia, come quella in fig. 6. Si hanno differenze fra i vari campioni nel numero, dimensioni e geometria di questi sistemi di innesco-propagazione; in alcuni casi dalla forma quasi semicircolare si passa ad una forma molto più allungata, fino praticamente ad interessare l'intera superficie laterale del provino, per la presenza contemporanea di più inneschi. In effetti questi sono comunque multipli: di solito il numero di inneschi visibili cresce aumentando gli ingrandimenti e quello che sembrava un innesco unico si rivela affiancato da microinneschi che poi danno origine ad un'unica propagazione. Un'altra caratteristica, anche se non sempre osservata, della superficie di rottura, è la presenza di scalini netti, corrispondenti all'avanzamento della rottura su più piani paralleli fino al distacco dei "ponti" formatisi, come chiaramente mostrato nella fig. 7.

Di particolare interesse si presenta il confine tra le due zone già esaminate. In prossimità di quella che, da un punto di vista geometrico, è una linea che separa due piani praticamente ortogonali si osserva spesso una particolare morfologia, correlata con l'avanzamento iniziale a 45° della rottura a fretting-fatica. Il piano di frattura presenta infatti un brusco sprofondamento a partire dalla superficie laterale, con la formazione di uno scalino subsuperficiale, per poi risalire gradatamente all'interno della zona della "conchiglia". Questo fenomeno è osservabile nella fig. 8, al confine fra le zone scura (longitudinale) e chiara (di rottura).

Dalla stessa fig. 8 si può rilevare sulla superficie laterale un altro aspetto caratteristico del fretting-fatica con pattino piano, sempre più evidente con l'aumentare del numero di cicli a rottura: la formazione di uno scalino fra la zona vergine e quella dove si è avuto fretting. Nel caso in figura, relativo ad un provino con vita superiore a un milione di cicli, lo scalino è particolarmente evidente.

Passando all'esame dei campioni delle prove effettuate col pattino cilindrico, la situazione non cambia molto anche se il confine della zona danneggiata dal fretting appare in genere meno pronunciato. In particolare non si osserva né il profondo scalino che si trova col pattino prismatico né, nella maggior parte dei casi, la zona con materiale riportato. Questo è dovuto alla forma cilindrica del pattino: la zona usurata dall'azione di sfregamento si collega infatti con quella non danneggiata non in modo brusco ma con un raccordo il cui raggio di curvatura è uguale, almeno in linea teorica, a quello del cilindro. Con tale conformazione, inoltre, i frammenti che si staccano dalle superfici a contatto vengono espulsi più facilmente dal movimento ciclico del pattino.

Esaminando la superficie di rottura, anche in questo caso si osserva la presenza di più inneschi superficiali distribuiti lungo tutta la larghezza del provino, con una zona di propagazione che ha la forma di una conchiglia unica o che, in qualche caso, è composta da alcune conchiglie separate.

Su tutti i campioni - relativi sia alle prove di fatica che di fretting-fatica - si osserva sulla superficie di frattura un elevato numero di cavità a forma di pori, particolarmente evidenti nella zona dove si è avuta rottura statica, fig. 9. L'aspetto tipico all'esame microscopico lascia presumere che siano il residuo dell'alloggiamento di un'inclusione estratta al momento della rottura. Tale interpretazione è confermata dalla microanalisi che, nei casi in cui l'inclusione è rimasta nella sede, rileva la presenza di solfuro



Fig. 7 - Avanzamento della rottura su più piani paralleli.

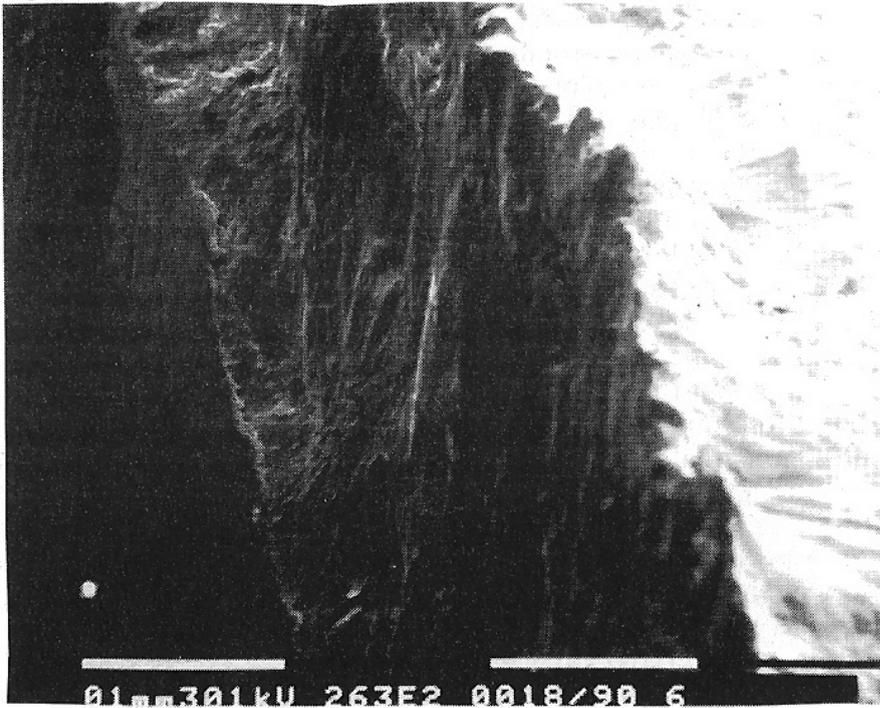


Fig. 8 - Scalini al confine della zona danneggiata dal fretting.



Fig. 9 - Pori nella zona di rottura statica e di fatica.

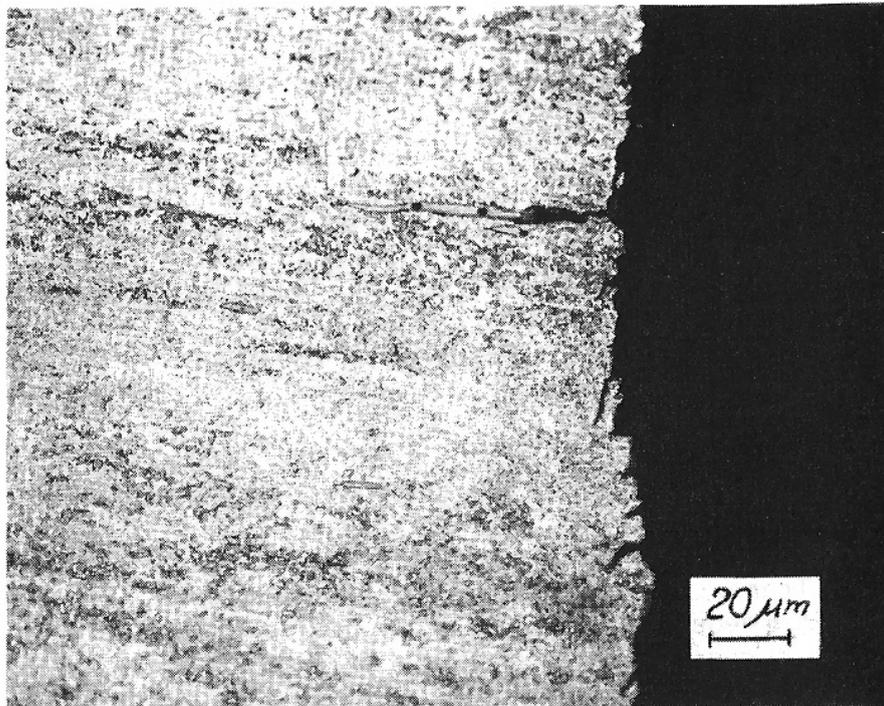


Fig. 10 - Sezione metallografica con inclusione.

di manganese. Anche l'esame metallografico su sezioni perpendicolari alla superficie di rottura indica chiaramente tale origine (fig. 10). Nella zona di fatica, visibile nella stessa figura, il numero e le dimensioni delle cavità lasciate dalle inclusioni sono molto minori.

Mentre l'effetto del fretting sulla nucleazione è evidente, più difficile risulta l'apprezzamento di un'eventuale influenza sulla propagazione. Anche alcune osservazioni riportate in letteratura relative ad aspetti considerati specifici per le rotture a fretting-fatica (come l'avanzamento iniziale a 45° delle cricche) possono in realtà ricondursi a particolari tipi di rotture a fatica, che si osservano anche in assenza di fretting. Comunque, una volta superata la caratteristica zona degli inneschi, sia la parte di rottura per propagazione a fatica che la parte di rottura finale per strappo non presentano morfologie significativamente diverse rispetto al caso della fatica pura.

CONCLUSIONI

Sono state condotte prove di fatica e di fretting-fatica, utilizzando due attrezzature diverse con pattino rispettivamente di forma cilindrica e prismatica. Le curve di Wöhler ottenute mostrano una marcata diminuzione di resistenza causata dall'azione di fretting ed una forte dipendenza dalle condizioni locali di contatto, legate anche alla particolare attrezzatura utilizzata.

Alle prove meccaniche sono state associate osservazioni microscopiche; lo studio frattografico ha messo in evidenza le morfologie della superficie di frattura e di quella dove si è avuto il danneggiamento di fretting, con particolare riguardo alle differenze rilevate tra provini rotti a fatica e a fretting-fatica.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato svolto in parte con fondi del MURST.

BIBLIOGRAFIA

1. Forsyth P.J.E. *Occurrence of fretting fatigue failures in practice*. Fretting Fatigue, Waterhouse R.B. ed., Applied Science Publishers LTD, London, 1981, pp.99-125.
2. Hoepfner D.W., Goss G.L. *Research on mechanism of fretting fatigue*. Corrosion Fatigue, Devereux O., McEvily A.J., Staehle R.W. eds., NACE-2, Houston, 1972, pp.617-626.
3. Waterhouse R.B. *Theories of fretting process*. Fretting Fatigue, Waterhouse R.B. ed., Applied Science Publishers LTD, London, 1981, pp.203-219.
4. Fenner A.J., Field J.E. *A study of the onset of fatigue damage due to fretting*. Trans. NE Coast Inst. Eng. Shipbuilders, 76, 1960, p.183.
5. Lazzeri L., Pedferri P. *Lo stato delle conoscenze sul fenomeno di corrosione per sfregamento*. Rivista di Meccanica, n.648/a, 1977, pp.191-203.
6. Waterhouse R.B., Taylor D.E. *The initiation of fatigue cracks in a 0.7% carbon steel by fretting*. Wear, 17, 1971, pp.139-147.

7. Zonfrillo G., Pratesi F., Bacci T., Del Puglia A. *Prove di fretting-fatiga su un acciaio da cementazione*. Atti del XVI Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni, L'Aquila, 1988, pp. 587-598.
8. Bacci T., Del Puglia A., Pratesi F., Zonfrillo G. *Fatigue and fretting fatigue fracture of hot rolled carburising steel*. ECF7, Failure Analysis - Theory and Practice, E.Czoboly ed., EMAS, Warley, UK, 1988, vol.II, pp.894-896.
9. Del Puglia A., Pratesi F., Zonfrillo G. *Fretting-fatiga: problematica e prove su un acciaio da cementazione*. Organi di Trasmissione, n.11, 1989, pp.60-66.
10. Zonfrillo G., Pratesi F., Del Puglia A. *Studio sulle condizioni sperimentali in prove di fretting-fatiga*. Atti del XVII Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni, Ancona, 1989, pp.213-222.
11. Lesne P.M., Savalle S. *Une loi différentielle d'endommagement avec périodes de micro-amorçage et de micropropagation*. La Recherche Aérospatiale, n.2, 1987, pp.33-47.
12. Zonfrillo G., Pratesi F., Del Puglia A. *Applications of multistage life prediction methods to fretting fatigue interaction*. Transactions of 10th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, Anaheim (Cal), USA, 1989, vol.L, pp.165-170.
13. Waterhouse R.B. *Occurrence of fretting in practice and its simulation in the laboratory*. Materials Evaluation Under Fretting Conditions, ASTM STP 780, 1980, pp.3-16.
14. Klaffke D. *Einfluß von Oberflächenschichten auf das Schwingungsverschleißverhalten von Stählen*. Vortrag auf VDI, 1983.
15. Zonfrillo G., Del Puglia A., Pratesi F. *Realizzazione di una attrezzatura per prove di fretting-fatiga*. Atti del XVII Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni, Amalfi, 1990, pp.243-252.
16. Hill D.A., Nowell D., O'Connor J.J. *On the mechanics of fretting fatigue*. Wear, 125, 1988, pp.129-146.