

# Danneggiamento per pitting di acciai bonificati, cementati e nitrurati

F. D'Errico, M. Boniardi, A. Casaroli

*La comprensione dei meccanismi di danneggiamento che portano al manifestarsi dell'usura per fatica è di fondamentale importanza per l'ottimizzazione dei materiali e dei trattamenti termici.*

*Il presente lavoro ha previsto l'esecuzione di prove di rotazione disco su disco (rolling disc-on-disc test).*

*Questo metodo si basa sulla rotazione simultanea di una coppia di dischi sagomati in modo da simulare il contatto tra superfici sferiche. Le prove sono state eseguite su tre differenti tipi di acciaio:*

- UNI EN 42CrMo4 bonificato;
- UNI EN 18NiCrMo5 cementato;
- UNI EN 42CrMo4 nitrurato

*Lo scopo del presente lavoro è quello di identificare i meccanismi di danneggiamento coinvolti nella fase di innesco del fenomeno di usura per fatica e durante la sua evoluzione.*

*A tal proposito sui campioni ottenuti dalle prove di rotazione disco su disco sono state condotte numerose analisi frattografiche sia ad occhio nudo, che mediante l'utilizzo del microscopio elettronico a scansione (SEM).*

*Sono stati identificati differenti meccanismi di danneggiamento a seconda del tipo di acciaio:*

- UNI EN 42CrMo4 bonificato: pitting dovuto a cricche originate negli strati superficiali fortemente incruditi.
- UNI EN 18NiCrMo5 cementato: pitting originato dagli ossidi depositati a bordo grano durante la fase di carburazione.
- UNI EN 42CrMo4 nitrurato: pitting dovuto a cricche che si innescano e propagano all'interno della coltre bianca.

## Parole chiave:

### INTRODUZIONE

#### Generalità

Le superfici di contatto di componenti meccanici in moto relativo (camme, ruote dentate, rulli e piste dei cuscinetti, ecc.) sono soggette ad usura. In generale i meccanismi di danneggiamento per usura possono essere distinti in sei categorie:

- usura adesiva
- usura abrasiva
- usura corrosiva
- usura erosiva
- usura per fretting
- usura per fatica.

Oggetto del presente lavoro è lo studio dei meccanismi di danneggiamento coinvolti nell'usura per fatica a cui viene anche attribuito il nome di fatica da contatto [1].

Nell'usura per fatica il cedimento è provocato dall'applicazione di una sollecitazione superficiale di tipo periodico (oscillante con valori del carico variabili nel tempo). Questi fenomeni si verificano anche in presenza di lubrificazione quando almeno uno dei due corpi a contatto rotola sull'altro.

In letteratura è comune riscontrare la distinzione fra crateri superficiali, di profondità inferiore ai 10  $\mu\text{m}$ , e crateri profondi, di profondità compresa fra 10  $\mu\text{m}$  e 200  $\mu\text{m}$ . Nel primo caso si parla di pitting mentre nel secondo di spalling.

Tale distinzione, pur risultando intuitiva, non permette di capire se lo spalling è causato dall'incremento di severità del pitting o se invece è dovuto ad un meccanismo di cedimento totalmente dif-

ferente. Sia il pitting che lo spalling, sono infatti dovuti, ad un accumulo di danneggiamento nelle zone sub-superficiali del materiale [2]. In tali zone si ha nucleazione e propagazione di cricche di fatica che evolvono verso la superficie del componente provocando la formazione di crateri. La dimensione del cratere, e quindi la formazione di pit piuttosto che di spall, è determinata dalla differenza fra la resistenza a fatica del materiale e la massima sollecitazione di scorrimento. Se la resistenza a fatica è molto più bassa della massima sollecitazione di scorrimento si avrà la formazione di pit, se invece le due sono simili si avrà la formazione di spall. In alcuni casi dai pit possono nucleare delle cricche ramificate. Le cricche penetrano in profondità, provocando il distacco di una porzione di materiale e generando un cratere di grandi dimensioni, di fatto indistinguibile da uno spall. A tale meccanismo si dà il nome di pitting progressivo o distruttivo [3].

È facile capire come la semplice analisi visiva non permetta di distinguere fra i due meccanismi che portano alla formazione di crateri di grandi dimensioni. Ciò provoca spesso confusione ed un uso indiscriminato dei termini pit e spall. L'analisi sperimentale svolta nel presente lavoro ha permesso di individuare, variare e monitorare i parametri che influiscono sulla generazione dei pit e degli spall. In tal modo si è riusciti a fare chiarezza sulle modalità con cui si sviluppano i due meccanismi di danneggiamento.

#### Meccanismi di danneggiamento coinvolti nell'usura per fatica

L'incertezza nell'identificazione del pitting o dello spalling è in gran parte dovuta a ipotesi insoddisfacenti per spiegare il meccanismo di danneggiamento a livello macroscopico.

L'usura per fatica è comunemente connessa ad un accumulo di danneggiamento nelle zone sub-superficiali del materiale [2]. In tale zone si ha nucleazione e susseguente propagazione di cricche di

Fabrizio D'Errico, Marco Boniardi, Andrea Casaroli  
Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica,  
Via La Masa 1, 20156 Milano, Italia.  
Corresponding author: fabrizio.derrico@polimi.it

fatica che evolvono verso la superficie del componente provocando la formazione di crateri.

Infatti, il carico trasmesso tra le due superfici in contatto induce uno sforzo all'interno del materiale, e le cricche si originano quando tale sforzo, eccede la resistenza a fatica.

Il contatto tra due corpi viene studiato secondo la teoria di Hertz che calcola la pressione di contatto e determina, in corrispondenza dell'asse di carico ( $z$ ), uno stato di sforzo in cui gli sforzi principali ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ , e  $\sigma_z$ ) sono di compressione e la massima tensione tangenziale si sviluppa in corrispondenza di un piano inclinato a  $45^\circ$  a una certa profondità rispetto alla superficie. Il danneggiamento progressivo è imputabile quasi esclusivamente alla tensione massima tangenziale. Quando lo sforzo massimo di taglio eccede il limite di fatica del materiale si ha la generazione e lo sviluppo di cricche.

La profondità a cui avviene la nucleazione delle cricche dipende da tre fattori:

1. Differenza tra resistenza a fatica del materiale in prossimità della superficie e massima sollecitazione di scorrimento.
2. Tipo di rotolamento (puro, con micro-slittamento, con slittamento).
3. Presenza di lubrificante.

Per quanto riguarda il primo fattore si osserva che:

- se la resistenza a fatica è comparabile con la massima sollecitazione di scorrimento si ha una elevata profondità di nucleazione;
- se la resistenza a fatica è molto più bassa della massima sollecitazione di scorrimento, si ha una piccola profondità di nucleazione.

Per quanto riguarda il secondo fattore si osserva che, in presenza di rotolamento con slittamento il massimo sforzo di taglio tende a spostarsi verso la superficie. Alla sollecitazione tangenziale dovuta alla pressione di contatto Hertziana (l'unica in caso di rotolamento puro) si aggiunge quella dovuta alla forza tangenziale generata dall'attrito fra le due superfici in slittamento. Essendo l'attrito un fenomeno che si sviluppa in superficie, la forza trasmessa e quindi lo sforzo tangenziale generato dovranno essere localizzati in tale zona.

Lo spostamento del massimo sforzo di taglio in superficie aumenta all'aumentare della severità dello slittamento che dipende dalla forza trasmessa fra le superfici a contatto, dalla presenza di un film di lubrificante e dal suo spessore. In caso di elevate forze di contatto ed elevato coefficiente di attrito (lubrificazione scarsa) il materiale appena al di sotto della superficie (0,1 mm) subisce una forte deformazione lungo la direzione di slittamento. Ciò provoca la formazione di regioni dalla microstruttura fortemente orientata ed un incremento della densità delle dislocazioni. Numerose analisi sperimentali hanno messo in evidenza che l'usura per fatica in condizioni di rotolamento con slittamento è spesso il risultato di cricche nucleate nelle zone superficiali fortemente incrudite [4]. Nel caso limite di forze di contatto elevate e di lubrificazione insufficiente o assente possono instaurarsi anche fenomeni tribossidativi a causa delle condizioni di rotolamento con slittamento severo che portano al riscaldamento della superficie. Per quanto riguarda il micro-slittamento si instaura in condizioni prossime a quelle di rotolamento puro in assenza di lubrificazione. Infatti anche se i carichi sono limitati i componenti in moto relativo sono sottoposti ad una certa deformazione in corrispondenza della zona di contatto. Tale zona non è quindi più rappresentata da un punto (per le sfere) o da una linea (per i rulli) ma da una superficie che sarà soggetta a micro-slittamenti. Analogamente agli slittamenti anche i micro-slittamenti provocano lo spostamento della sollecitazione massima di scorrimento verso la superficie [5]. Per quanto riguarda il terzo fattore si osserva come l'utilizzo di un film di lubrificante permetta di ridurre notevolmente l'effetto

dell'usura per fatica. La presenza contemporanea di un'adeguata quantità di lubrificante e di superfici a rugosità ridotta in rotazione relativa, consente di instaurare un regime di lubrificazione idrodinamica. Le condizioni di lubrificazione idrodinamica permettono la creazione di un film di fluido lubrificante che:

- Ha una dimensione compresa fra  $0,1 \mu\text{m} \div 1 \mu\text{m}$ .
- Raggiunge pressioni molto elevate.
- Impedisce il contatto diretto fra le superfici in moto relativo e ne causa la deformazione elastica.
- Consente di ridurre l'effetto dell'usura adesiva e dell'usura per fatica.

In realtà è possibile ottenere lubrificazione idrodinamica anche in presenza di superfici a rugosità elevata, come quelle che normalmente si riscontrano in applicazioni industriali. Le condizioni di lubrificazione idrodinamica si instaurano, infatti, all'interno dei piccoli dislivelli dovuti alla rugosità superficiale. In questo caso si parla di lubrificazione micro-idrodinamica [6]. In tali zone si sviluppano pressioni locali molto elevate che possono superare il carico di snervamento del materiale. In caso di materiali duttili è quindi possibile la deformazione plastica delle asperità superficiali ed una drastica diminuzione della rugosità. A tale fenomeno si dà il nome di "surface distress".

Come detto in precedenza l'utilizzo di un film di lubrificante permette di ridurre notevolmente sia l'usura adesiva che quella per fatica. L'abbattimento della prima è dovuto alla capacità del fluido di impedire il contatto fra le asperità superficiali, mentre la diminuzione della seconda è dovuta alla riduzione del coefficiente di attrito e quindi dell'entità dello slittamento. Infatti l'interposizione del film di lubrificante permette di avvicinarsi alle condizioni di puro rotolamento eliminando la forza tangenziale generata dalla forza di attrito.

In presenza di lubrificazione i cedimenti, da usura per fatica, possono essere costituiti sia da crateri superficiali che da crateri di grandi dimensioni. Ciò è dipendente dalle condizioni di lubrificazione, e quindi dalla presenza di slittamenti o microslittamenti e dal carico applicato.

In presenza di una cricca superficiale preesistente, o generata durante il funzionamento, il lubrificante può avere un effetto dannoso. In tali condizioni il fluido può rimanere intrappolato all'interno della cricca, ed essere portato in pressione nel momento in cui la zona danneggiata passa al di sotto della superficie di contatto. L'elevata pressione raggiunta all'interno della cricca ne forza la propagazione nel materiale.

## Influenza delle proprietà meccaniche dello strato superficiale

Come già accennato in precedenza, la nucleazione delle cricche che portano al distacco dei frammenti di usura ha inizio quando la tensione tangenziale massima eccede il limite di fatica del materiale. L'usura per fatica è un fenomeno di danneggiamento superficiale, è quindi evidente come incrementando il limite di fatica in prossimità della superficie sia possibile incrementare la resistenza all'usura per fatica.

A tale scopo, una volta selezionato il materiale, è possibile sottoporre la superficie ad opportuni trattamenti termici quali la bonifica o termochimici quali la cementazione o la nitrurazione.

L'esecuzione dei trattamenti termici permette di migliorare le proprietà meccaniche del materiale in superficie, aumentandone la durezza ed il limite di fatica. Per quanto riguarda la cementazione e la nitrurazione si ha l'ulteriore effetto di indurre tensioni residue di compressione, utili ad incrementare la resistenza a fatica del materiale.

Per comprendere l'effetto che i trattamenti termici hanno sui meccanismi di danneggiamento coinvolti nell'usura per fatica, si è deciso di realizzare una serie di prove di rotazione disco su disco (rolling disc-on-disc test). Le prove, di tipo accelerato, sono sta-

te eseguite tramite un opportuno apparato sperimentale in grado di riprodurre le condizioni operative necessarie per causare l'usura per fatica. I test sono stati condotti sugli acciai UNI EN 42CrMo4 bonificato, UNI EN 42CrMo4 nitrurato e UNI EN 18NiCrMo5 cementato.

## APPARATO E PROCEDURA SPERIMENTALE

L'apparato sperimentale utilizzato per l'esecuzione delle prove di usura per fatica (figura 1) prevede l'utilizzo di due dischi messi in contatto e forzati a ruotare.

I dischi (nominati campioni) presentano diametro esterno di 120 mm ed uno spessore di 20mm. Il loro profilo è arrotondato, in modo da consentire la simulazione di un contatto sferico (figura 2).

La macchina di prova è equipaggiata con:

- Due trasduttori in grado di misurare la velocità angolare dei dischi. Conoscendo la velocità angolare è infatti possibile determinare la velocità periferica e con questa calcolare il tasso di slittamento. La macchina permette di realizzare sia condizioni di rotolamento puro che di rotolamento con strisciamento.
- Un attuatore idraulico, provvisto di cella di carico (capacità di carico: 5kN) e centralina elettronica attraverso cui regolare la forza di contatto.
- Una pompa idraulica con annesso circuito di raccolta e filtraggio dell'olio necessario per realizzare le condizioni di rotolamento con lubrificazione.

Le prove di usura per fatica sono state eseguite sugli acciai:

- UNI EN 42CrMo4 bonificato. I campioni denominati Q1 e Q2 sono stati ricavati da una barra tonda bonificata e quindi rifiniti alle macchine utensili.
- UNI EN 18NiCrMo5 cementato. I campioni denominati C1 e C2 sono stati ricavati da una barra tonda per poi essere cementati, bonificati e rifiniti alle macchine utensili.
- UNI EN 42CrMo4 nitrurato. I campioni denominati N1 e N2 sono stati ricavati da una barra tonda per poi essere bonificati, rifiniti alle macchine utensili e nitrurati.

Per tutti i campioni si è provveduto alla pulizia meccanica della zona di contatto tramite carte abrasive di granulometria crescente in modo da ottenere una superficie il più possibile liscia.

Le composizioni chimiche e le proprietà meccaniche dei tre acciai sono riportate in tabella 1 e tabella 2.

Di seguito sono elencate le condizioni sperimentali rispettate durante le prove di usura per fatica:

- Il test sul campione Q1 è stato eseguito in condizioni di rotolamento puro senza lubrificazione.
- I test sui campioni Q2, C1, C2, N1, N2 sono stati eseguiti in condizioni di rotolamento puro con lubrificazione.
- La forza di contatto applicata durante le prove è stata calcolata a partire dalla massima pressione Hertziana ( $PH_{max}$ ) necessaria per riprodurre le reali condizioni di esercizio.

L'espressione di  $PH_{max}$  è definita dall'equazione:

$$PH_{max} = 3F/(2\pi a^2) \quad [7]$$

dove "F" è la forza di contatto e "a" è il raggio della superficie circolare che si genera in un contatto Hertziano tra due corpi elastici sferici.

- L'evoluzione dei danneggiamenti superficiali è stata osservata ad occhio nudo ad intervalli di circa 60.000 cicli.
- Le indagini frattografiche sono state eseguite sia ad occhio nudo che tramite l'ausilio del microscopio elettronico a scansione (SEM). Per comprendere al meglio i meccanismi di cedimento coinvolti, i campioni danneggiati sono stati sezionati, lucidati ed osservati al SEM.

La sintesi dei parametri di lavoro con cui sono stati condotti i test è riportata in tabella 3.



FIG. 1 *Apparato sperimentale utilizzato per l'esecuzione delle prove di usura per fatica: a) Vista d'insieme b) Campione Q2 in regime di moto di rotolamento puro con lubrificazione.*

*Apparatus test machine for rolling contact: a) whole parts b) particular of rolling contact specimens (Q2) in movement during test.*

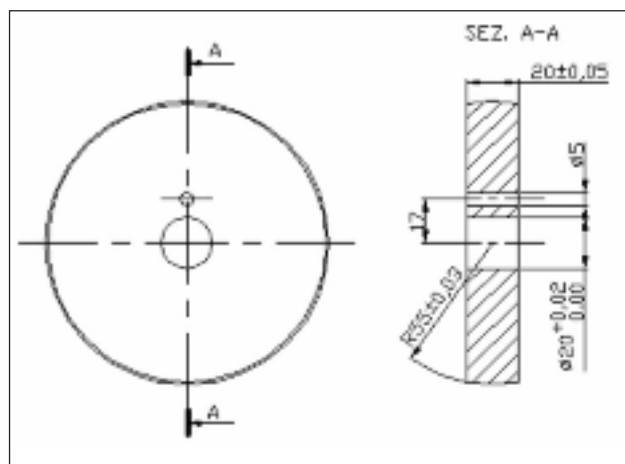


FIG. 2 *Geometria e dimensioni del disco di prova. Disc specimen geometry.*



**FIG. 3** Danneggiamento per pitting osservato ad occhio nudo sul campione Q2 ( $2.12 \times 10^6$  cicli).

Example of pitting damage observed on test specimen Q2; surface appearance after  $2.12 \times 10^6$  cycles.



**FIG. 4** Danneggiamento per pitting osservato ad occhio nudo sul campione C2 ( $5 \times 10^6$  cicli).

Example of pitting damage observed on test specimen C2; surface appearance after  $5 \times 10^6$  cycles.



**FIG. 5** Danneggiamento per pitting osservato sul campione N2 ( $3.6 \times 10^6$  cicli).

Example of pitting damage observed on test specimen N2; surface appearance after  $3.6 \times 10^6$  cycles.

Codifica	Nomenclatura	% C	% Cr	% Ni	% Mo	% Si	% P	% S	% Mn
Q	UNI EN 42CrMo4	0.44	1.05	-	0.18	0.26	0.0127	0.0035	0.82
C	UNI EN 18NiCrMo5	0.16	0.87	1.14	0.15	0.12	0.0119	0.0028	0.56
N	UNI EN 42CrMo4	0.44	1.05	-	0.18	0.26	0.0127	0.0035	0.82

**TAB. 1** Composizione chimica degli acciai oggetto di esame. Chemical composition of tested steels.

Codifica	Tattamento termico	Durezza a cuore [HV]	Spessore a 550 HV heff [mm]	Durezza Superficiale [HV]	Condizioni superficiali nella zona di contatto
Q	Tempra a $860^{\circ}\text{C}$ , Rinvenimento a $640^{\circ}\text{C}$	360	-	360	Pulizia di tipo meccanico
C	Carburazione $920^{\circ}\text{C}$ , Tempra a $870^{\circ}\text{C}$ , Rinvenimento a $180^{\circ}\text{C}$	-	1,48	670	Pulizia di tipo meccanico
N	Tempra a $860^{\circ}\text{C}$ , Rinvenimento a $640^{\circ}\text{C}$ , Nitrurazione a $540^{\circ}\text{C}$	-	0,43	690	Pulizia di tipo meccanico

**TAB. 2** Proprietà meccaniche dei trattamenti termici eseguiti sugli acciai oggetto di esame. Mechanical properties and heat treatment cycle for the three materials.

Codifica	Pressione Hertziana [MPa]	Lubrificazione	Numero di cicli in corrispondenza dell'osservazione ( $\times 10^6$ )	Numero di cicli totale ( $\times 10^6$ )	Tipo di contatto	Tipo di cedimento
Q1	1000	No	0.54	0.54	Rotolamento Puro	Tribo-ossidazione
Q2	1000	Si	0.49	2.12	Rotolamento Puro	Pitting
C1	1800	Si	8.08	8.08	Rotolamento Puro	Pitting
C2	2200	Si	3.49	4.95	Rotolamento Puro	Pitting
N1	2000	Si	8.10	8.10	Rotolamento Puro	Pitting
N2	2400	Si	7.05	10.05	Rotolamento Puro	Pitting

**TAB. 3** Parametri di prova e risultati.

Test parameters and main test results.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

### Campioni Q

Dalle prove di usura sui campioni in UNI EN 42CrMo4 bonificati è emerso che per gli acciai sottoposti alla sola bonifica i mec-

canismi di danneggiamento prevedono tre fasi differenti:

1. Le sollecitazioni indotte dalla pressione Hertziana provocano cambiamenti microstrutturali nelle zone superficiali e sub-superficiali al di sotto dell'area di contatto.

2. Si formano zone superficiali e sub-superficiali a forte deformazione plastica ed elevato incrudimento.
3. Micro-cricche nucleano all'interno delle zone a forte deformazione plastica. Le cricche propagano e risalgono in superficie causando il distacco dei frammenti di usura.

Durante la prima fase, si riscontrano cambiamenti microstrutturali nelle zone superficiali e sub-superficiali dovuti agli sforzi generati dalla pressione Hertziana agente nell'area di contatto. Tali cambiamenti vanno ad influire sulle proprietà meccaniche del materiale. Se durante la prima fase si instaurano le condizioni di lubrificazione idrodinamica si assiste alla formazione di pit di dimensioni microscopiche (detti micro-pit) che permettono di eliminare le tracce lasciate dalle lavorazioni alle macchine utensili effettuando una vera e propria lucidatura della superficie. Tale fenomeno prende il nome di pitting correttivo e viene sfruttato per realizzare il rodaggio di componenti meccanici in moto relativo fra loro.

Nella seconda fase si assiste allo sviluppo di bande di deformazione plastica in prossimità della zone superficiali e sub-superficiali. La deformazione plastica porta alla formazione di zone fortemente incrudite ed è favorita dal comportamento duttile del materiale. Rispetto ai campioni cementati (C) o nitrurati (N) i campioni Q hanno subito il solo trattamento di bonifica e presentano quindi una zona superficiale con durezza inferiore e duttilità superiore.

Nella terza fase si assiste alla nucleazione di micro-cricche all'interno delle zone superficiali e sub-superficiali fortemente incrudite. Le micro-cricche propagano e risalgono in superficie causando il distacco dei frammenti di usura. Nel caso di acciai sottoposti alla sola bonifica la formazione di cricche superficiali è favorita rispetto a quelle sub-superficiali. La maggiore duttilità rispetto ai campioni C ed N favorisce la deformazione plastica che, a causa dei fenomeni di microslittamento e di lubrificazione micro-idrodinamica, tende ad essere concentrata sulla superficie del materiale.

Le analisi frattografiche confermano quanto esposto in precedenza:

- figura 6: mostra un pit formato sulla superficie del campione

Q2. Sono chiaramente visibili il punto di innesco e le striature tipiche delle rotture per fatica. La formazione delle striature è dovuta alla buona duttilità dei campioni Q e sarebbe impossibile da ottenere con i campioni C ed N la cui superficie è stata indurita dai trattamenti di cementazione e nitrurazione.

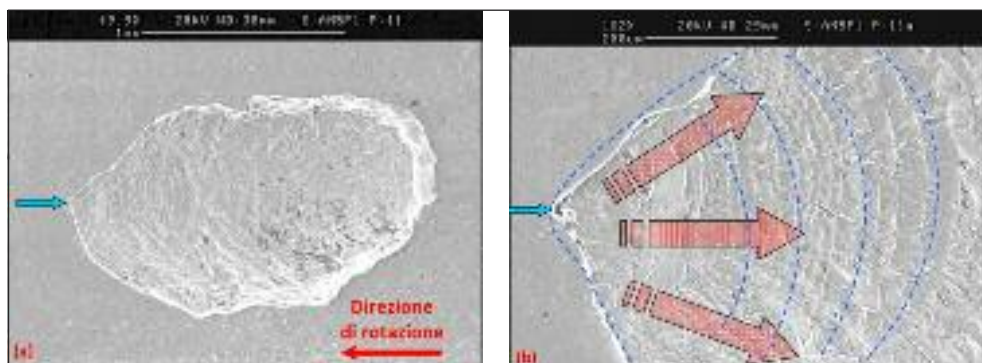
- figura 7: mostra alcuni pit di grandi dimensioni ottenuti dalla coalescenza di pit di dimensione minore generati sulla superficie del campione Q2.
- figura 8: mostra alcune scalfitture dovute al forte incrudimento delle zone superficiali del campione Q2. Se osservate in sezione si nota come dalle zone danneggiate siano propagate in profondità delle cricche ramificate.

## Campioni C

Dalle prove di usura sui campioni in UNI EN 18NiCrMo5 cementato è emerso come i fenomeni di danneggiamento si sviluppino in modo molto diverso rispetto agli acciai sottoposti alla sola bonifica. Ciò è dovuto essenzialmente alle differenti proprietà meccaniche degli strati superficiali cementati, più duri e meno duttili rispetto a quelli degli acciai che hanno subito la sola bonifica.

L'aumento della durezza e delle conseguenti proprietà meccaniche, quali la resistenza a fatica, permette di aumentare la pressione Hertziana massima  $PH_{max}$  sopportabile dal componente e quindi di aumentare le forze di contatto scambiate. L'aumento della durezza permette di aumentare anche la resistenza alla surface distress e quindi di evitare la plasticizzazione degli strati superficiali e sub-superficiali in cui si ha la nucleazione delle cricche. Il miglioramento delle proprietà meccaniche avviene a discapito della duttilità ed è per questo che il danneggiamento degli strati cementati segue meccanismi di rottura tipici dei materiali fragili. Le cricche nucleano a partire dagli ossidi fragili formati a bordo grano durante la fase di carburazione e propagano in superficie causando la formazione di pit. Quando il pit si trova in corrispondenza dell'area di contatto causa l'intensificazione locale del campo di sforzi Hertziano. Ciò provoca il distacco progressivo di piccoli fram-

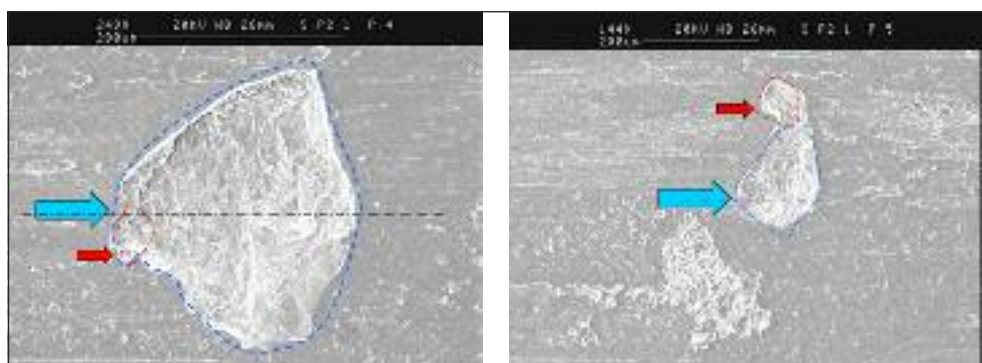
**FIG. 6**  
Pit sulla superficie del campione Q2. Sono visibili le linee di spiaggia: a) la freccia azzurra indica il punto di innesco b) dettaglio del punto di innesco, sono ben evidenti le striature tipiche dei cedimenti per fatica.



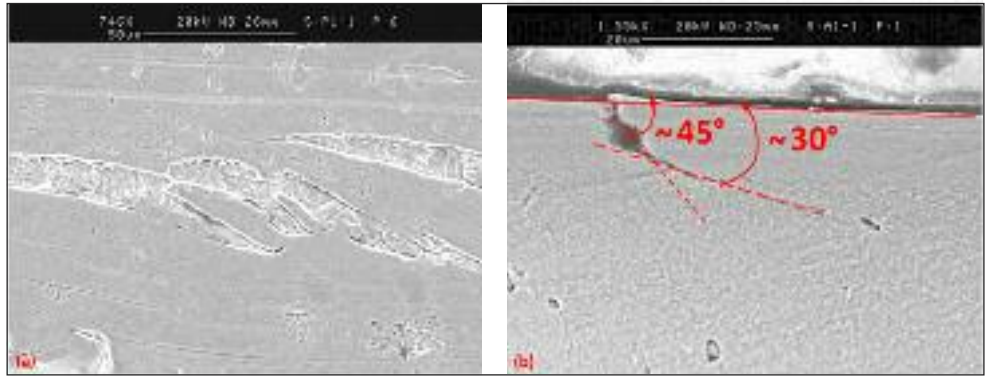
Pit on damaged surface of Q2 specimen. An usual sea-shell-shape is visible: a) the narrow indicate the starting point; b) details of starting point, which put in evidence the micro-striations typical of fatigue crack propagation.

**FIG. 7**  
Danneggiamento della superficie del campione Q2 dovuto a pit generati dalla coalescenza di crateri di piccole dimensioni.

Pits on damaged surface resulted from coalescence of smaller craters.

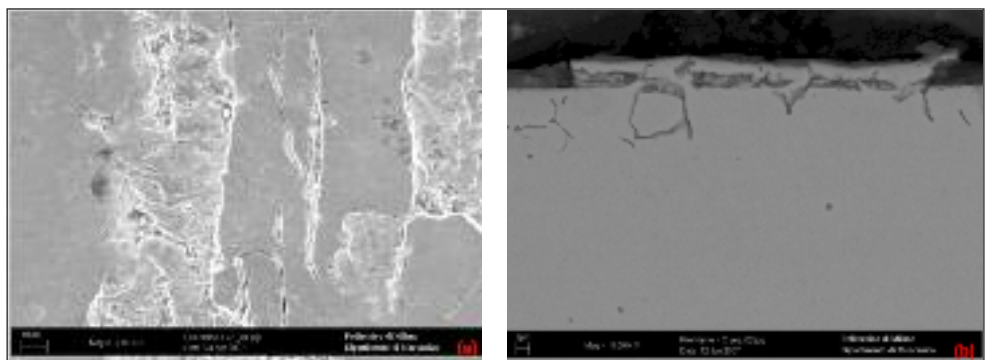


**FIG. 8**  
Micro-cricche nucleate a partire da zone superficiali incrudite del campione Q2. Analisi frattografica su: a) superficie b) sezione trasversale in corrispondenza della zona di propagazione della cricca.



Surface micro-cracks started on surface with stretched appearance (specimen Q2). fractographic investigation on: a) top surface b) transversal section in correspondence of crack propagation.

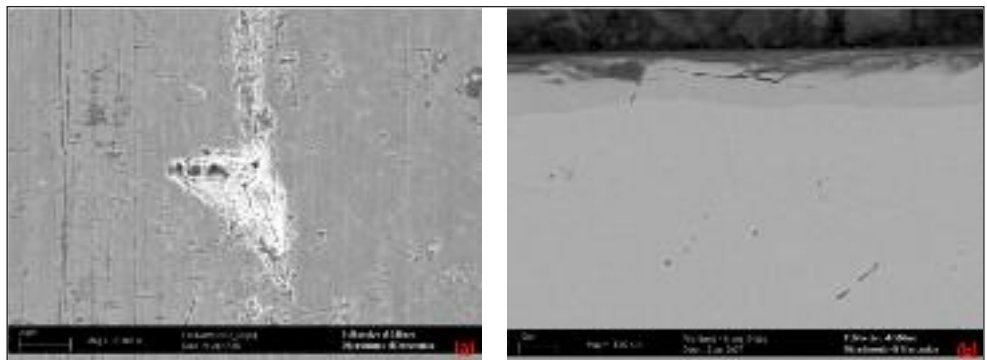
**FIG. 9**  
Danneggiamento della superficie del campione C2. Analisi frattografica su: a) superficie b) campione sezionato, si nota come la cricca nuclei in corrispondenza degli ossidi a bordo grano generati durante la fase di carburazione.



Surface micro-cracks started on surface of C2 specimen. Fractographic investigation on: a) top surface b) sectioned sample shows fractures form in correspondence of intergranular oxide sites.

**FIG. 10**  
danneggiamento della superficie del campione N2. Analisi frattografica: a) superficie b) cricca in fase di propagazione all'interno della coltre bianca.

Surface ruptures on nitrated specimen N2. Fractographic investigations on : a) top surface b) crack propagation inside the white-layer.



menti di materiale e l'ingrandimento del pit.

Le analisi frattografiche confermano quanto affermato in precedenza. La figura 9 mostra il danneggiamento del campione C2 sia in superficie che in sezione. L'immagine mette ben in evidenza come le cricche nucleino a partire dagli ossidi a bordo grano formati durante la fase di carburazione. Questo problema viene spesso ridotto eliminando gli strati cementati più superficiali tramite operazioni di rettifica. Tale operazione non è però obbligatoria e nel caso in esame la profondità dello strato affetto da ossidazione intergranulare rientra all'interno del limite tollerato dalla normativa.

## Campioni N

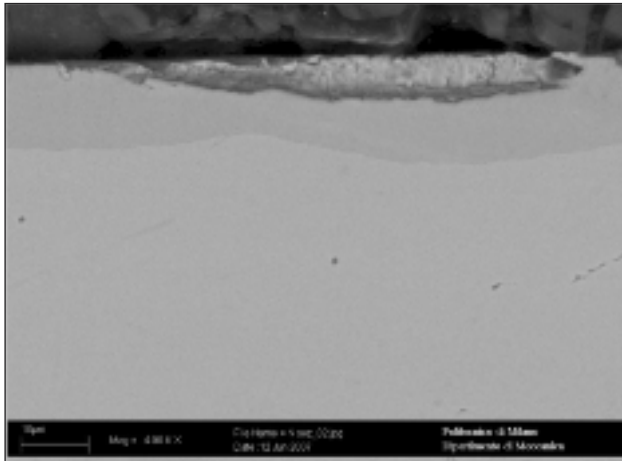
Dalle prove di usura sui campioni in UNI EN 42CrMo4 nitrurati è emerso come anche per gli acciai nitrurati i fenomeni di danneggiamento si sviluppino in modo molto diverso rispetto agli acciai sottoposti alla sola bonifica. Come per gli acciai cementati anche per quelli nitrurati l'aumento della durezza e la diminuzione della duttilità delle zone superficiali porta all'insorgere di mec-

canismi di rottura di tipo fragile. Negli acciai nitrurati le cricche nucleano e propagano all'interno della coltre bianca per poi riemergere provocando la formazione di pit. Quando il pit si trova in corrispondenza dell'area di contatto causa l'intensificazione locale del campo di sforzi Hertziano. Questo provoca il distacco progressivo di piccoli frammenti di materiale e l'ingrandimento del pit. Ciò è confermato dalle analisi frattografiche riportate nelle figure 10 e 11 (vista superficiale e in sezione del campione N2).

## CONCLUSIONI

È stata realizzata una apparecchiatura sperimentale per l'esecuzione di test accelerati di usura per fatica. I test sono stati eseguiti in condizioni di rotolamento puro con lubrificazione, in modo da simulare le condizioni di esercizio che più di frequente si riscontrano nella realtà industriale. Le prove sono state eseguite sugli acciai:

- UNI EN 42CrMo4 bonificato
- UNI EN 18NiCrMo5 cementato



**FIG. 11** *Danneggiamento della superficie del campione N2. Come si nota i pit sono contenuti all'interno della coltre bianca.*

*Fractographic investigation on a largest cavity formed inside the white-layer (specimen N2).*

- UNI EN 42CrMo4 nitrurato

I test hanno permesso di individuare i meccanismi di danneggiamento coinvolti nell'usura per fatica degli acciai comunemente utilizzati per la produzione di componenti meccanici sottoposti a moto relativo di tipo rotante.

In sintesi, è possibile concludere che:

- In condizioni di rotolamento puro con lubrificazione, l'usura per fatica è sempre dovuta a pitting, generato da cricche superficiali o sub-superficiali che provocano il distacco dei frammenti di usura.
- I meccanismi di danneggiamento che portano alla formazione del pitting variano in funzione delle proprietà meccaniche degli strati superficiali.
- Nell'acciaio UNI EN 42CrMo4 bonificato i pit sono causati da microcricche o scalfitture nucleate e propagate nelle regioni superficiali fortemente incrudite dai fenomeni di microslittamento e surface distress. Gli strati superficiali dell'acciaio UNI EN 42CrMo4 bonificato presentano infatti durezza inferiore e maggiore duttilità rispetto a quelli degli acciai UNI EN 18NiCrMo5 cementato e UNI EN 42CrMo4 nitrurato. Per tale motivo la su-

perficie dell'acciaio UNI EN 42CrMo4 bonificato è maggiormente soggetta all'incrudimento.

- Per l'acciaio UNI EN 18NiCrMo5 cementato il danneggiamento degli strati superficiali segue meccanismi di rottura tipici dei materiali fragili. Le cricche nucleano a partire dagli ossidi fragili formati a bordo grano durante la fase di carburazione e propagano in superficie causando la formazione di pit. Quando il pit si trova in corrispondenza dell'area di contatto causa l'intensificazione locale del campo di sforzi Hertziano. Ciò provoca il distacco progressivo di piccole frammenti di materiale e l'ingrandimento del pit.
- Per l'acciaio UNI EN 42CrMo4 nitrurato il danneggiamento degli strati superficiali segue meccanismi di rottura tipici dei materiali fragili. Le cricche nucleano e propagano all'interno della coltre bianca [8] per poi riemergere provocando la formazione di pit. Quando il pit si trova in corrispondenza dell'area di contatto causa l'intensificazione locale del campo di sforzi Hertziano. Ciò provoca il distacco progressivo di piccole frammenti di materiale e l'ingrandimento del pit.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare Colmegna S.p.A. ed i suoi tecnici per il supporto dato nella realizzazione dell'apparecchiatura di prova e per l'esecuzione dei trattamenti termici.

## BIBLIOGRAFIA

1. Stachowiak, G.W., Batchelor, A.W., Engineering Tribology (Second Edition), Elsevier Butterworth Heinemann (2001)
2. Tallian T.E., Failure atlas for Hertz contact machine elements, ASME Press, New York (1992)
3. Neale M.J., The Tribology Handbook second edition, Oxford, Butterworth-Heinemann (1995)
4. Kimura Y., Mechanisms of Wear - the Present State of Our Understanding, Transactions JSLE, Vol. 28 (1983)
5. Johnson K.L., Contact Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge (1987)
6. Sayles R.S., De Silva G.M.S., Leather J.A., Anderson J.C., Macpherson P.B., Elastic Conformity in Hertzian Contacts, Tribology International, Vol. 14 (1981)
7. Irwin J.D., Mechanical Engineer's Handbook, Academic Press, San Diego (2001)
8. S.J.Bull, J.T.Evans, B.A.Shaw, D.A.Hoffman, The effects of white layer on micro-pitting and surface contact fatigue failure of nitrided gears, Engineering Tribology, 213 (1999)

## Abstract

### Micro-pitting damage mechanism on hardened and tempered, nitrided and carburizing steels

**Keywords:** contact fatigue, surface fatigue, rolling contact, micro-pitting, carburizing, nitriding.

A deep comprehension of the damage mechanisms involved in contact fatigue is basic to optimize materials and heat treatments for specific applications. In this work rolling disc-on-disc contact fatigue tests have been performed on three different materials: an hardened and tempered UNI EN 42CrMo4, a nitrided UNI EN 42CrMo4 steel and a carburized UNI EN 18NiCrMo5 steel. The test method adopted was optimized to best realize such conditions able to develop micro-pitting on different materials. The main aim of this test campaign was to investigate and compare damage on surface, in terms of initiating and propagating mechanisms. Extensive micro-fractographic analyses were performed on the damaged samples by the use of a scanning electronic microscope (SEM). For hardened and tempered steel, failure mode was micro-pitting, started from surface, but evolved into pitting because of crack path extending more deeply beneath the surface. Pits always originated on top surface and propagated as like a common fatigue crack. In the case of carburized steel, micro-pitting initiated at oxides at most surface grain boundaries, i.e. those sites characterized by greatest brittleness. Superficial cracks initiated and propagated inside the white-layer for the nitrided steel. Once initiated, micro-pits may develop. Damaging rate can significantly increase by coalescence of small closest pits into a larger crater so much micro-pitting phenomena do not arrest, but it can degenerate into destructive pitting and spalling. Significant difference however exist for ductile surface or hardened one.