

Caratteristiche richieste agli organi meccanici: la resistenza all'usura, alle pressioni specifiche e alla fatica

M. Boniardi, F. D'Errico, F. Micari

La progettazione degli organi meccanici è sicuramente uno dei classici campi di applicazione dell'ingegneria meccanica. I criteri riguardanti la scelta dei materiali, il dimensionamento statico o un primo dimensionamento a fatica di questa classe di componenti sono ormai da tempo consolidati e normati. Nuove opportunità di ottimizzazione del progetto degli organi meccanici sono da ricercarsi quindi nello studio di tutti quegli aspetti che permettono di aumentarne la vita in esercizio, quali la fatica, la fatica da contatto e l'usura, senza ricorrere ad inutili quanto gravosi sovradimensionamenti. Escludendo la rottura da sovraccarico, queste sono le tre principali cause di danneggiamento che possono determinare la prematura rottura durante l'esercizio del pezzo. Scopo di questo articolo è proprio quello di illustrare i fenomeni che guidano tali meccanismi per permetterne una migliore comprensione e cercare di fissare delle linee guida da seguire per una ottimizzazione del progetto.

Parole chiave: usura, fatica, fatica da contatto, pitting

L'USURA

L'usura è sicuramente uno dei principali fenomeni da prevedere e controllare nella progettazione e messa in esercizio di tutti quei componenti meccanici che presumono una trasmissione di forze attraverso il contatto di superfici in movimento relativo. Organi come ingranaggi, camme e manovellismi, se mal progettati, vengono danneggiati da fenomeni di usura a tal punto da comprometterne prematuramente la loro funzionalità. Per questa ragione l'usura dei materiali metallici è stata studiata sempre con molto interesse.

La tribologia ha individuato tre tipologie di usura in funzione del meccanismo di danneggiamento predominante:

- usura adesiva/abrasiva e da delaminazione;
- usura da ossidazione;
- usura in presenza di fusione.

Negli ultimi anni si sta, inoltre, cercando di correlare tra loro i parametri significativi del danneggiamento per usura dei componenti (velocità relativa, forza scambiata, presenza o meno di lubrificanti, ecc.) mediante l'utilizzo di mappe appositamente studiate, che permettano di indicare il meccanismo di usura predominante. La descrizione dei fenomeni fisici e meccanici che originano le varie tipologie di usura permetterà, quindi, una migliore comprensione della lettura di tali mappe.

I fenomeni coinvolti nel danneggiamento delle superfici dipendono strettamente dalle caratteristiche termo-meccaniche dei corpi costituenti il sistema tribologico (per sistema tribologico si intende l'insieme dei due corpi antagonisti e di un eventuale terzo corpo interposto).

In genere il fenomeno di danneggiamento per usura si manifesta macroscopicamente con la modifica dello stato superficiale di uno o di tutti i corpi facenti parte del sistema tribolo-

gico. Il progredire del danno è determinato dalla più o meno graduale asportazione dello strato più esterno di materiale.

Osservando al microscopio la zona di contatto tra due superfici ci si accorge di come essa non sia continua e uniforme; al contrario ognuna delle due superficie presenta delle asperità. Come conseguenza il contatto tra i due corpi non avviene su tutta la superficie nominale, bensì è limitato ai soli punti di contatto tra le asperità. Anche se la pressione nominale scambiata (quella cioè calcolata sulla superficie nominale A_0) risulta inferiore al limite di snervamento del materiale, di fatto, a causa della minore dimensione dell'area di contatto reale, si osserveranno fenomeni di plasticizzazione locale. Nella realtà, il contatto avviene in corrispondenza delle microcreste del profilo di rugosità sì da incrementare notevolmente le pressioni locali al punto da indurre deformazioni plastiche del materiale e possibili microsaldature; successivamente la zona plasticizzata può essere trasferita da un corpo all'altro o può distaccarsi sotto forma di particella (vedi figura 1) [1].

Le particelle di materiale provenienti dall'elemento pin si saldano sulla superficie del disco. In figura 1.a si nota la linea di separazione tra la particella plasticizzata trasferita e la superficie antagonista (indicata con una freccia). La superficie del pin viene ad essere danneggiata dal continuo distaccarsi di porzioni di materiale. Contemporaneamente queste stesse particelle possono generare residui di materiale incrudito (figura 1.c) che amplificano il fenomeno abrasivo poiché vanno ad interporsi tra i due corpi a contatto.

Altro aspetto correlato all'usura adesiva è legato alla durezza relativa tra i due materiali accoppiati. Il componente caratterizzato da una durezza superficiale inferiore subirà la maggiore asportazione di materiale da parte dell'antagonista. In questo caso le stesse particelle separate potranno agire da terzo corpo qualora la maggiore durezza (indotta dai normali fenomeni di incrudimento) sarà sufficiente a contribuire all'avanzamento del danno (schema di figura 2.b). Questo è il caso tipico di organi meccanici nei quali volutamente una delle due parti in moto relativo è realizzata con un materiale a minor durezza, sì da poter essere "sacrificato" al fine di preservare il suo antagonista. Tipici esempi sono gli alberi a gomito per impieghi automobilistici e i loro cuscinetti antifrizione (bronzine).

M. Boniardi, F. D'Errico

Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano

F. Micari

FFConsulting, Lissone (MI)

Memoria presentata alla giornata di studio AIM "Scelta del trattamento termico in funzione dell'impiego degli organi meccanici in acciaio", Milano, 28 marzo 2003

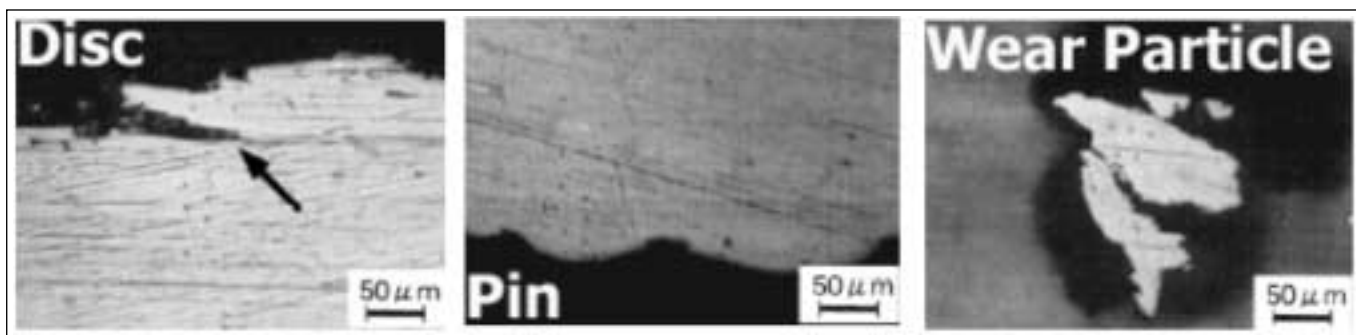


Fig. 1 – Micrografie al microscopio elettronico a scansione. Meccanismi di trasferimento di materiale dal pin al disc rilevato durante prove di usura. Sulla superficie del disco viene a depositarsi materiale distaccato dal pin: microfessura tra il materiale di base e la particella trasferita (a); superficie antagonista del pin (b); singola particella distaccata che funge da terzo corpo abrasivante (c) [1].

Fig. 1 – Detailed SEM micrographs. Mechanism involved in material transferring from pin to disc, revealed by wear tests. Particles separate from the pin attaching on the disc surface: a micro-crack generated into the bulk preludes to the particle detaching (a); the surface of the opponent pin (b); the particle behaves as a third body, promoting abrasive wear (c) [1].

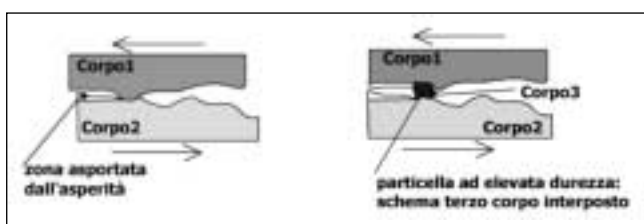


Fig. 2 – Schema esemplificativo del meccanismo di danneggiamento superficiale: per deformazione plastica (a); per usura abrasiva da terzo corpo interposto (b).

Fig. 2 – Scheme of the two main damaging mechanisms acting on opponent surfaces: plastic deformation (a); third body abrasive wear (b).

Se i due materiali hanno durezza confrontabili il corpo abrasivante potrà essere costituito da particelle estranee, come rappresentato in figura 2.b. In tal caso non sarà possibile predire quale dei due componenti si danneggerà maggiormente.

Nel progetto delle macchine è buona norma fare uso di appropriati filtri per olio, aria, tenute per alberi, sì da scongiurare il pericolo di inquinamento dell'ambiente in cui lavorano le superfici d'accoppiamento.

Tuttavia la presenza di un ambiente controllato ed esente da inquinamenti esterni, non esclude un danneggiamento superficiale indotto da fenomeni abrasivi. Di fatto, in presenza di alte velocità di strisciamento e coefficienti di attrito superiori allo 0.4 [2] le superfici incorrono repentinamente in fenomeni di usura indotti da deformazione plastica localizzata. Le pressioni in gioco inducono microcricche superficiali a seguito della plasticizzazione locale delle microasperità. A causa delle alte temperature in gioco, le porzioni di materiale distaccate tendono normalmente ad ossidarsi, con conseguente aumento della loro durezza (usura in presenza di ossidazione).

In presenza di regimi termici più spinti (favoriti da alte velocità relative e carichi elevati), possono indursi locali micro-fusioni in corrispondenza delle superfici a contatto (melting wear). Le conseguenti trasformazioni strutturali delle zone interessate dal fenomeno sono responsabili di sensibili variazioni delle caratteristiche meccaniche.

Non sempre però i vari fenomeni sono così nettamente distinguibili. In figura 3 è riportato, come esempio, l'andamento del gradiente delle durezza in funzione della distanza dalla superficie di contatto tra i due corpi di un sistema pin-on-disc. I punti all'interno del riquadro rappresentano i dati di durezza relativi agli strati più superficiali del pin e delle particelle asportate. In presenza di ossigeno, i valori di durezza misurati sulle particelle asportate e quelli relativi ai primi strati del pin sono molto prossimi. Non così marcato è,

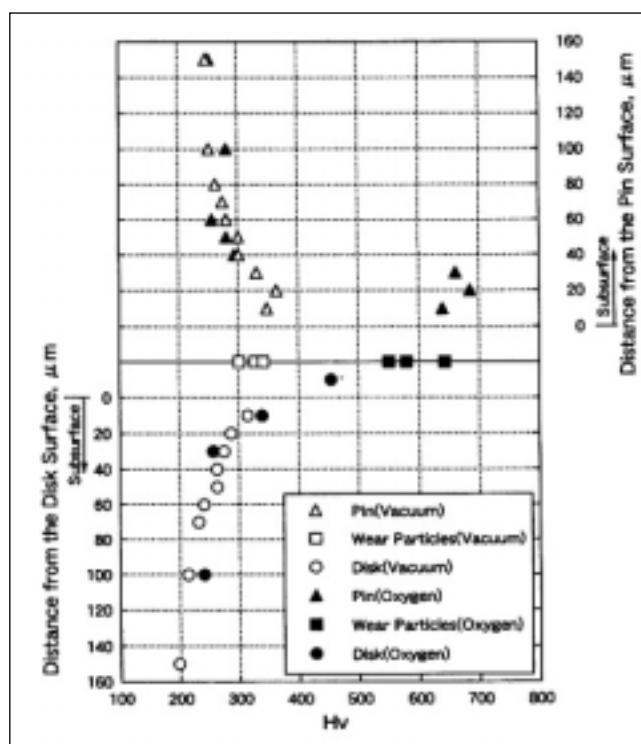


Fig. 3 – Misure di microdurezza Vickers (carico applicato 0.03 N) rilevate negli strati sub-superficiali dei corpi antagonisti (pin e disco), sulle porzioni di materiale trasferite dal pin al disco e sulla superficie delle particelle distaccate (wear particles). Materiali accoppiati Ni-Ni; velocità relativa: 293 mm/s; carico applicato: 16.2 N; distanza di strisciamento: 200 m [2].

Fig. 3 – Vickers micro-hardness (load of 0.03 N) performed on surface and subsurface of the contact bodies (pin and disc), on the material transferred from pin to disc and on wear particles detached. The materials of the opponent bodies were Ni-Ni; sliding rate: 293 mm/s; loading: 16.2 N; sliding distance covered: 200 m [2].

invece, il gradiente di durezza rilevato nelle zone subsuperficiali del disco e del pin. Il trasferimento di materiale dal pin al disco induce sulla superficie di quest'ultimo un leggero incremento di durezza. La superficie più esterna del pin è caratterizzata da durezza comparabili con quella delle particelle scalzate, per fenomeni di incrudimento da plasticizzazione [3]. Dal confronto tra i risultati delle prove condotte in vuoto e quelli ottenuti in presenza di ossigeno se ne deduce che i fenomeni ossidativi contribuiscono non poco al danneggiamento superficiale.

Il meccanismo che porta all'usura della superficie non risul-

ta facilmente classificabile secondo le tipologie classiche prima enunciate. Tanto lo schema dell'usura adesiva che quello dell'usura abrasiva entrano in gioco fino a provocare il danneggiamento a livello macroscopico. Inoltre, i parametri guida responsabili del meccanismo di danneggiamento dominante non sono facilmente identificabili. La temperatura in corrispondenza delle asperità superficiali, ad esempio, gioca sicuramente un ruolo fondamentale a riguardo. Molti fenomeni quali transizioni di fase o transizione da comportamento fragile a duttile dei materiali antagonisti, sono fortemente legati all'aumento della temperatura provocata dallo strisciamento relativo tra le parti [2].

Il tentativo di costruire modelli di previsione capaci di prevedere il comportamento tribologico in un sistema meccanico necessita di un'opportuna correlazione tra le evidenze sperimentali ed i modelli matematico-numeric. Attualmente uno dei principali problemi da risolvere consiste nella identificazione dei parametri chiave che intervengono nei diversi casi, al fine di realizzare una schematizzazione fedele alla situazione reale.

L'approccio moderno dei fenomeni di usura tende a classificare ed interpretare il danneggiamento secondo lo schema basato sull'entità del danno prodotto, piuttosto che secondo quello dei fenomeni che si manifestano. Si parlerà, quindi, di usura moderata (mild-wear), elevata (severe wear) ed in presenza di fusione (melting wear) a seconda del danno riscontrato sulle superfici interessate.

L'idea di base è quella di identificare, all'interno delle singole classi, tanto i fenomeni di danneggiamento dominanti, quanto le condizioni di lavoro responsabili del danno.

La legge con la quale si valuta su scala macroscopica il danneggiamento è data da:

$$V = K \cdot P / R_s$$

o in alternativa:

$$V = K \cdot A_c \cdot s$$

dove P è il carico applicato, s è lo spostamento relativo, A_c è la superficie di contatto e R_s è la caratteristica meccanica caratterizzante il materiale (sollecitazione unitaria di snervamento); K è una costante di proporzionalità misurata sperimentalmente che tiene conto delle condizioni di lubrificazione.

Per quanto le relazioni espresse risultino valide in sede di progetto e di verifica, esse appaiono limitative rispetto alle evidenze sperimentali del fenomeno.

Di maggiore efficacia appare allora la strada tracciata dalla letteratura recente nell'elaborazione delle Mappe di Usura per diversi materiali, come mostrato in figura 4.

In ascissa e in ordinata vi sono le due grandezze macroscopiche del fenomeno (carico applicato e velocità di strisciamento), rese in forma adimensionale⁽¹⁾. Le aree rappresentate all'interno della mappa forniscono le informazioni circa i fenomeni di danneggiamento dominanti su scala microscopica: ciò consente di evidenziare immediatamente le possibili problematiche in esercizio in funzione dei parametri progettuali. Da un punto di vista qualitativo, le succitate mappe permettono di prevedere quali saranno i fenomeni dominanti che tenderanno a manifestarsi.

Come già anticipato, la temperatura localizzata in corrispondenza delle asperità risulta un parametro fondamentale nella determinazione del meccanismo di danneggiamento.

In corrispondenza di basse velocità di strisciamento (zona a sinistra della mappa), le temperature raggiunte sono basse ed il contatto può considerarsi freddo. Per velocità di stri-

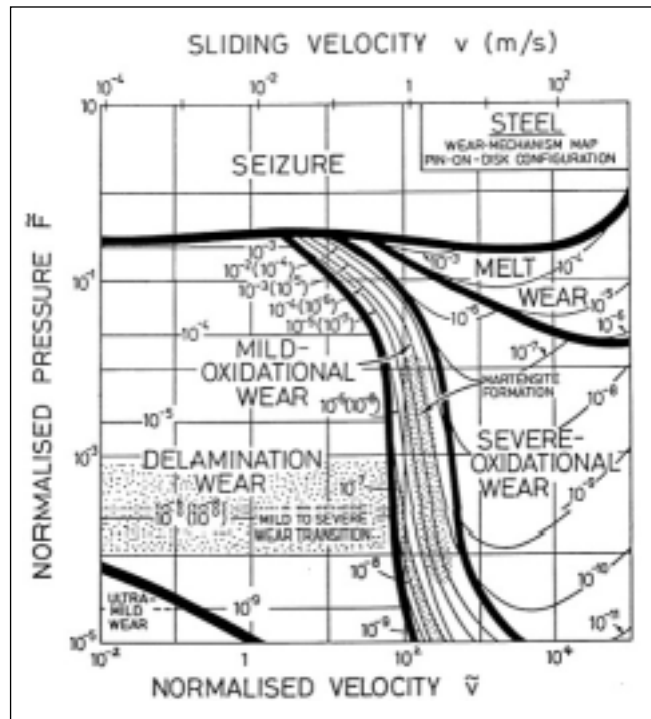


Fig. 4 - Mappa di usura per acciai al carbonio, in assenza di lubrificazione (prove pin-on-disc) [4].

Fig. 4 - Wear Map for carbon steels, in absence of lubricant (pin-on-disc tests) [4].

sciamento inferiori a circa 1 m/s, la temperatura al contatto non raggiunge valori rilevanti in grado di promuovere importanti fenomeni ossidativi (temperatura di flash).

In presenza di lubrificazione, la formazione di un sottile film di ossido funge da ulteriore mezzo di separazione tra i materiali antagonisti: grazie alla maggiore durezza dell'ossido, i fenomeni di usura risultano attenuati, a patto che questo si mantenga compatto ed integro. Tale condizione è assicurata, infatti, dai bassi carichi in gioco (zona di ultra-mild wear) [5]. Quando lo stato di sforzo diventa tale da produrre eccessive deformazioni nel materiale sottostante, lo strato di ossido cede in modo fragile. Si va incontro a fenomeni di delaminazione superficiale. Nelle condizioni in esame, si assiste spesso al riformarsi dello strato di ossido e l'usura delle superfici procede con velocità molto contenute [5].

L'aumento progressivo del carico porta alla inevitabile rottura dello strato di ossido: i carichi locali raggiungono valori tali da perforare lo strato di ossido preventivamente formatosi, inducendo in tal modo il contatto diretto tra le parti metalliche antagoniste. Queste a loro volta saranno soggette a nuova ossidazione e successiva rottura, innescando inevitabilmente un processo di deterioramento progressivo [1,6-7].

Quando la velocità di strisciamento supera la soglia indicativa di 1 m/s, il calore prodotto per attrito raggiunge valori non più trascurabili, incrementando l'entità dei processi ossidativi (tribo-oxidation). In queste condizioni l'ossidazione gioca un ruolo fondamentale nella generazione del danno.

Per quanto riguarda sistemi tribologici in cui l'accoppiamento avviene tra acciai, si usa distinguere due tipologie di usura ossidativa: usura per ossidazione moderata (mild-oxidational-wear) ed elevata (severe-oxidational wear) [4].

Con l'aumento ulteriore dei carichi e/o delle velocità relative hanno luogo trasformazioni strutturali: spesso si forma della martensite a causa delle elevate temperature raggiunte e successivi rapidi raffreddamenti, non appena abbandonato il contatto. Questo accade perché il riscaldamento è fortemente localizzato, interessando porzioni di materiale molto ridotte, e l'asportazione di calore avviene con leggi estrema-

⁽¹⁾ Più precisamente si tratta della velocità normalizzata $v = v \cdot r_0 / a$ (con v velocità di strisciamento, r_0 raggio del pin, a diffusività termica) e della forza normalizzata $F / (A \cdot H_0)$ (dove F è la forza nominale di contatto, A l'area nominale di contatto ed H_0 la durezza superficiale a temperatura ambiente).

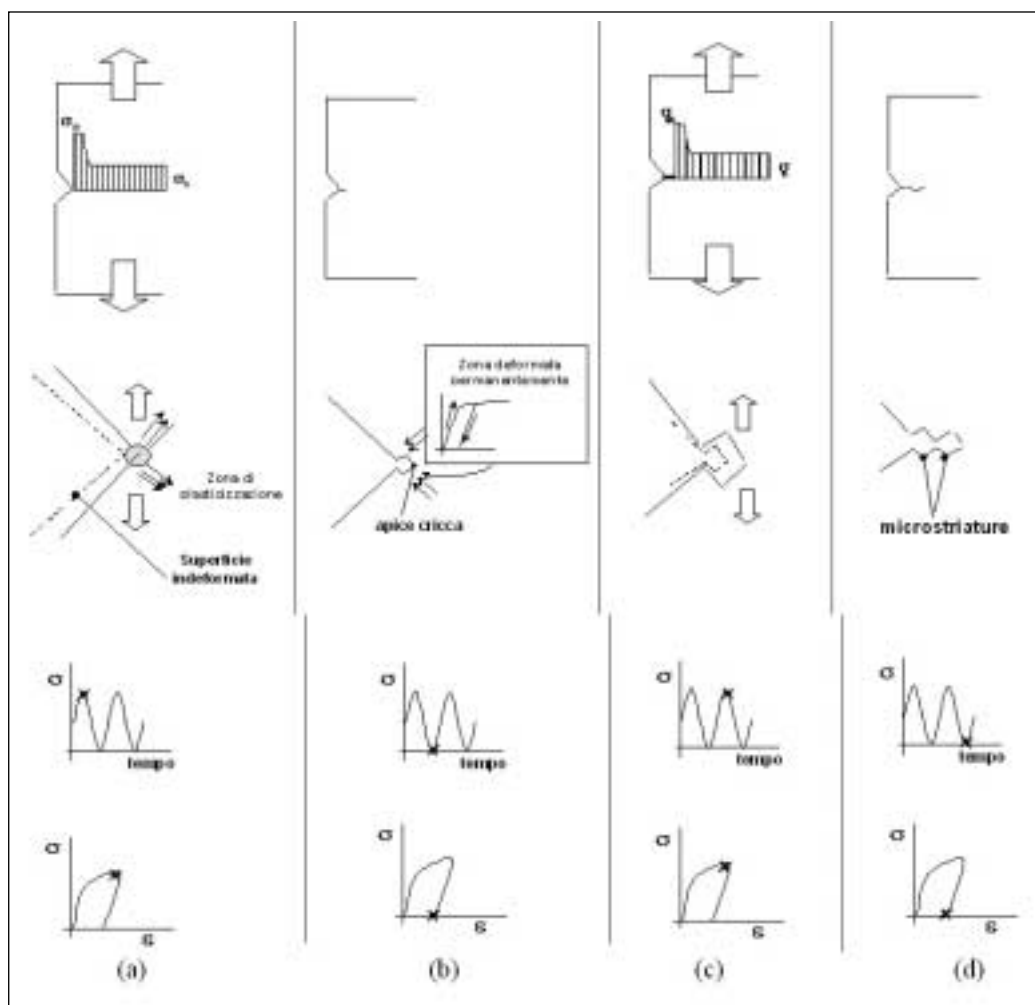


Fig. 5 – Schema esemplificativo delle modalità di innesco e propagazione di una cricca di fatica. Il materiale in prossimità di un intaglio si plasticizza deformandosi permanentemente secondo piani di taglio a 45° con la massima sollecitazione applicata (a); durante la successiva fase di scarico, questo recupera le deformazioni, tranne nella zona plasticizzata ed incrudita (b); al successivo carico (c) le condizioni di sovrassollecitazione all'apice cricca si ripetono, iterando il fenomeno (d).

Fig. 5 – Scheme of the fatigue crack: starting and propagating steps. In presence of a severe intensification of the stress, crack tip plasticizes preferentially with slip plane 45° oriented perpendicular to maximum stress direction (a); during the unload, material exhibits the elastic recovery, except for the hardened plasticized zone (b); a new load cycle (c) will perform the same state of stress-deformation at the tip, iterating all the topics (d).

mente rapide. L'elevata conduzione termica (per via del materiale contiguo a bassa temperatura) e l'aggiunta di fenomeni convettivi a carico del lubrificante (o aria, se a secco) determinano le condizioni per una vera e propria tempra. Contemporaneamente le elevate temperature in gioco provocano un'ulteriore accelerazione dei fenomeni ossidativi, con incremento notevole della cinetica di danneggiamento. A conclusione di questa breve trattazione è utile sottolineare che la classificazione dei diversi fenomeni di usura non comporta un loro intervento in forma esclusiva dell'uno rispetto all'altro: spesso è infatti impossibile evitare completamente l'usura dei due componenti a contatto, come accade anche in presenza di fenomeni di danneggiamento per fatica. Come conseguenza l'unica possibilità progettuale è quella di creare le migliori condizioni per cui il deterioramento delle superfici sia il più blando possibile, agendo sulla possibile separazione delle superfici mediante regimi di lubrificazione idrodinamica (qualora le condizioni operative lo consentano), sulla adeguata viscosità del lubrificante (controllandone la sua stabilità in funzione delle temperature di esercizio), nondimeno lavorando sulla durezza/tenacità del materiale in corrispondenza degli strati superficiali a contatto. Questo ultimo aspetto, spesso posto in secondo piano, presuppone infatti la valutazione delle modalità di propagazione del danno: tanto meno tenace risulterà il materiale, tanto più rilevanti saranno i fenomeni di scagliatura e progressiva asportazione di particelle. Da evitare per i pezzi cementati, ad esempio, sono le superfici ipercarburate in presenza di elevati carichi e velocità di strisciamento poiché, pur dotate di elevata durezza, mal si comportano in presenza di elevate temperature di lavoro, come già discusso in precedenza. D'altra parte non trascurabili sono gli effetti dannosi indotti da una carburazione condotta in forno con potenziale di car-

bonio non corretto, che spesso porta a generare sulle prime porzioni superficiali (pochi centesimi di mm) stati residui a trazione, piuttosto che di compressione, nonostante il particolare trattamento termochimico adottato⁽²⁾.

LA FATICA

Sottoponendo a carichi ciclici gli organi meccanici, questi manifestano limiti di resistenza inferiori a quelli che possiederebbero qualora fossero sollecitati in maniera statica. La sollecitazione statica comporta l'applicazione del carico in maniera progressiva e con velocità comparabili a quelle utilizzate nelle prove meccaniche classiche di tipo quasi statico (trazione, compressione, flessione e torsione) atta a caratterizzare i diversi materiali.

La presenza di un carico dinamico comporta invece significative differenze che comportano, di conseguenza, tipologie di danneggiamento assai differenti.

In tali condizioni di carico le disomogeneità presenti nel materiale (disomogeneità microstrutturali, segregazioni, inclusioni non metalliche, porosità residue, ecc.) unitamente allo stato delle superfici (rugosità, durezza, tensioni residue, ecc.), giocano un ruolo di primaria importanza nella nucleazione di cricche che, propagandosi, daranno origine al cedimento per fatica.

⁽²⁾ La causa è essenzialmente da ricercare in una lieve decarburazione occorsa in forno durante il trattamento di cementazione; le curve di trasformazione anisoterma del materiale si modificano al punto che i primi strati interessati dalla trasformazione austenite → martensite non saranno più quelli più esterni, come invece a priori ipotizzabile. Stati di tensionamento residuo a trazione si manifesteranno pericolosamente proprio in corrispondenza della zona epidermica del pezzo.



Fig. 6 – Particolare al SEM di microstriature prodotte durante l'avanzamento della cricca di fatica.

Fig. 6 – A SEM detail of the micro-striations originated during the crack opening stage.

Le microcricche di fatica innescano in corrispondenza dei “punti deboli” del materiale, laddove i livelli di sforzo raggiungono valori ben oltre il limite di snervamento locale del materiale. Molto dannosi in tal senso sono gli intagli meccanici presenti sulla superficie, come avviene ad esempio per spallamenti e gole per sedi di cuscinetti, linguette, chiavette, raccordi di sezione, ecc.

Riferendoci allo schema semplificato riportato in figura 5, in presenza di carichi ciclici applicato su un provino intagliato, durante la fase di apertura della cricca (fase di sollecitazione a trazione, in corrispondenza dell'apice dell'intaglio gli sforzi superano il limite elastico del materiale.

Una piccola zona, quindi, sarà interessata da deformazioni plastiche, oltre al conseguente locale incrudimento subito dal materiale. Non appena il carico viene rimosso (figura 5.b) il materiale recupera elasticamente, tranne ovviamente nella piccola area interessata dalle deformazioni permanenti. Al ripetersi del ciclo successivo, la zona interessata dalla nuova plasticizzazione si localizzerà, evidentemente, in corrispondenza dell'apice della cricca che, in tal modo, procede nella sua propagazione.

A livello microscopico, l'avanzamento della cricca secondo lo schema ipotizzato è confermato dalla presenza sulla superficie di frattura di microstriature visibili ad elevati ingrandimenti.

Esse sono la traccia della zona localmente plasticizzata e non perfettamente richiusa (figura 6).

Queste microstriature nulla hanno a che fare con le cosiddette linee di spiaggia, visibili ad occhio nudo quando le condizioni di carico e la storia di carico lo consentono (figura 7). Le linee di spiaggia, infatti, sono da collegare ai ripetuti arresti e ripartenze della cricca di fatica per effetto di variazioni sensibili delle condizioni di carico applicato. La possibilità di un'os-



Fig. 7 – Rottura per fatica di un binario ferroviario; macrofrattografia della zona interessata dal danno; sono visibili ad occhio nudo le linee di spiaggia.

Fig. 7 – Fatigue rupture of a rail; macrograph taken from the fracture surface; crack-arrest lines are visible to the naked eye.

servazione evidente delle linee di spiaggia è di solito agevolata dall'ossidazione delle superfici affacciate della cricca.

L'avanzamento della cricca procederà fino a quando la sezione resistente residua non sarà più in grado di sopportare staticamente il carico applicato e quindi si manifesterà la rottura di schianto.

Il rapporto tra la superficie rotta di schianto e la superficie totale può fornire delle utili indicazioni circa i criteri di progettazione seguiti. In presenza di una piccola zona interessata dall'avanzamento della cricca, ad esempio, si potrebbe ipotizzare che il progettista abbia eseguito i suoi calcoli con coefficienti di sicurezza contenuti.

Qualsiasi variazione brusca della geometria di un componente è inequivocabilmente responsabile di fenomeni di intensificazione degli sforzi.

A titolo di esempio in figura 8 è riportato lo studio agli elementi finiti di un componente strutturale comunemente impiegato nel settore ciclistico. Generalmente noto come foderi, questo componente permette il collegamento tra la ruota posteriore ed il telaio. Rilevando sperimentalmente alcuni parametri di carico, si è in grado di valutare al banco prova dinamico la risposta della struttura ai carichi che simulano il futuro comportamento in esercizio (sollecitazioni imposte dallo scatto in volata, da una salita con pendenza limite, frenata, ecc.). Accoppiando a queste misurazioni su componente una simulazione FEM (Finite Element Method), il progettista è in grado di rilevare le zone critiche del componente. A questo punto è possibile con modifiche poco onerose (se paragonate con quelle un tempo effettuate sul pezzo reale) valutare le migliorie apportate in termini di redistribuzione delle tensioni applicate. Pur con gli accorgimenti necessari per evitare geometrie pericolose in termini di sovrasollecitazioni, non è possibile escludere completamente la presenza



Fig. 8 – Studio agli elementi finiti di un elemento strutturale per impiego ciclistico: componente modellato in 3D (a); mappa dei valori di sforzo secondo Von Mises (b)

Fig. 8 – Finite Element Analysis performed on a structural part for cycling applications: the 3D model (a); Von Mises state of stress (b).

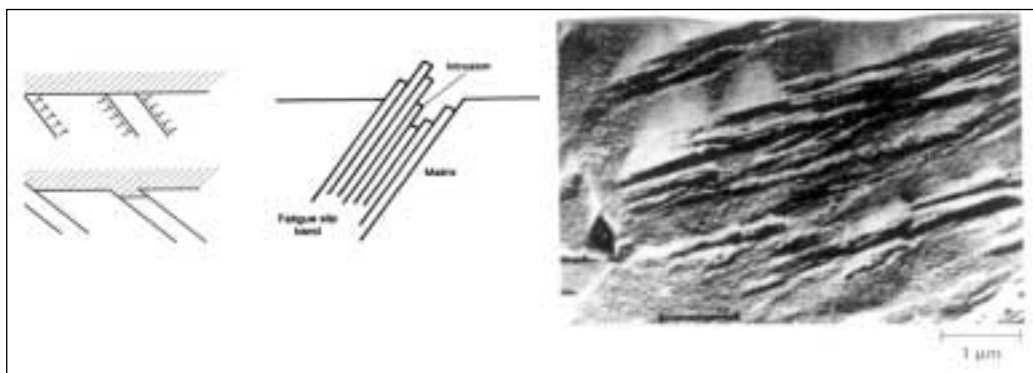


Fig. 9 – Schema di innesco di cricche secondo il modello delle micro-intrusioni e micro-estrusioni (a); particolare rilevato al SEM del difetto generato (b).

Fig. 9 – Crack starting schematized with the micro-extrusions and micro-intrusions model (a); a SEM detail (b).

di difetti a livello microscopico e microasperità superficiali che, a tutti gli effetti, sono sede di punti preferenziali di innesco delle cricche. Anche in presenza di finitura superficiale molto curata, a seguito dei movimenti dei piani cristallografici responsabili della deformazione di un reticolo cristallino⁽³⁾, si assiste alla formazione di micro-estrusioni e micro-intrusioni, con conseguente innesco della cricca (figura 9). La vita a fatica di un pezzo meccanico, quindi, dipende fortemente dal suo stato superficiale, soprattutto quando il carico applicato induce le massime tensioni in corrispondenza della superficie del componente come accade in organi sollecitati a flessione, a flessione rotante o a torsione. Tuttavia, anche in presenza di fatica assiale la massima sovrasollecitazione può manifestarsi in corrispondenza della superficie come si verifica quando sono presenti raggi di raccordo o intagli del pezzo meccanico.

Un modo di influire sulla resistenza a fatica consiste nel preservare e migliorare il comportamento meccanico del materiale in corrispondenza degli strati superficiali del componente. Due sono i possibili miglioramenti: da un lato, l'incremento locale delle caratteristiche resistenziali del materiale e, dall'altro, l'instaurarsi di stati di tensionamento residui di compressione in superficie. Spesso entrambi i due miglioramenti indicati agiscono in collaborazione, come accade nel caso di pezzi che abbiano subito trattamenti termici superficiali, quali tempra ad induzione, o trattamenti termochimici, quali cementazione o nitrurazione.

Nel caso della tempra ad induzione -praticata su organi di trasmissione che debbano mantenere buone doti di tenacità a cuore (core), insieme con elevata durezza in superficie (case)- il trattamento imposto induce nello strato superficiale la

formazione di struttura martensitica di piena tempra. L'aumento localizzato di volume (imputabile alla trasformazione austenite-martensite) risulta contrastato dal substrato sottostante: il materiale sarà soggetto quindi a stati di tensionamento residui di compressione in superficie. Contemporaneamente, la nuova struttura martensitica di piena tempra avrà caratteristiche resistenziali e di durezza superiori rispetto alla lega base.

L'incremento di resistenza a fatica per effetto dei miglioramenti imposti dal trattamento superficiale è spiegato schematicamente in figura 10.

Quando il pezzo subisce una sollecitazione (la massima sollecitazione è in corrispondenza della superficie), l'aumento di resistenza del materiale insieme alla presenza di tensioni residue di compressione inducono una significativa diminuzione delle tensioni applicate, riducendo il cimento locale del materiale.

Un effetto del tutto simile a quello descritto si ottiene attraverso i trattamenti termochimici superficiali.

In alternativa alla tempra superficiale⁽⁴⁾ è possibile indurre stati di tensionamento residui di compressione mediante fenomeni locali di plasticizzazione indotte sulla superficie.

Questo è quanto accade durante le operazioni di pallinatura delle superfici degli organi meccanici: piccole sferette di ghisa o acciaio vengono lanciate ad elevata velocità contro la superficie del pezzo inducendo microdeformazioni locali e stati tensionali di compressione.

I fenomeni di plasticizzazione locale provocano un superamento del limite elastico in prossimità della superficie: come conseguenza, quando il pezzo è scarico, si osserverà la presenza di uno stato residuo di compressione sulla superficie del pezzo.

Effetti simili alla pallinatura si manifestano nei processi di

⁽³⁾ Un materiale metallico si deforma in modo permanente a causa dello scorrimento (indotto dai locali sforzi tangenziali) dei suoi piani reticolari. A seguito dell'applicazione di carichi esterni, gli scorrimenti saranno statisticamente più probabili per quei grani i cui piani di facile scorrimento (presenza di dislocazioni, difetti reticolari, etc) si trovino orientati secondo la massima tensione tangenziale, quindi a circa 45° rispetto gli sforzi interni di trazione o compressione [8].

⁽⁴⁾ A causa delle elevate temperature di esecuzione del trattamento di tempra superficiale si osservano sensibili distorsioni dei pezzi che devono, conseguentemente, essere ripresi di macchina utensile prima della loro messa in esercizio.

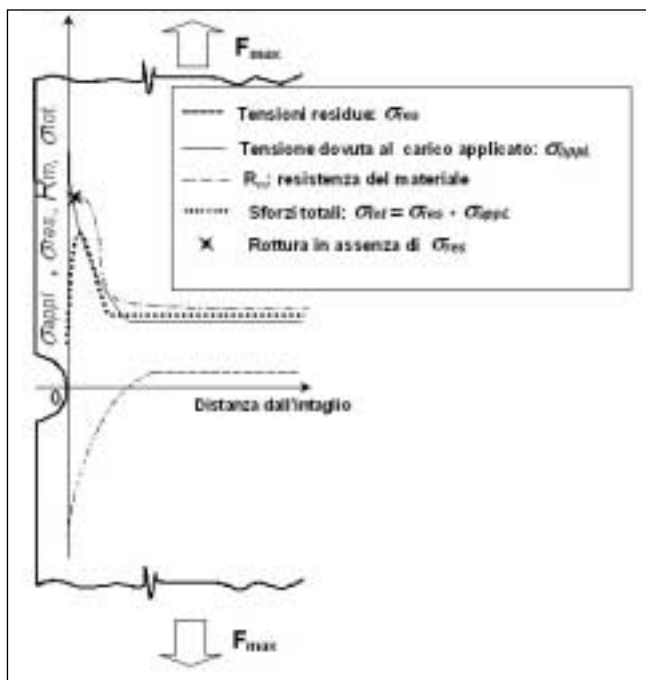


Fig. 10 – Variazione dello stato di sollecitazione e verifica di resistenza in presenza di un intaglio e di tensioni residue di compressione.

Fig. 10 – Influence of a residual compressive stress field on the state of stress resulting at the notch.

rullatura e di prestress (vedi figura 11).

Il processo di prestress consiste nel deformare in maniera controllata, oltre il limite di snervamento, le porzioni di superficie del pezzo: si genereranno degli stati di tensione di compressione particolarmente benefici nei confronti della resistenza a fatica del pezzo. Tipico è il caso delle molle a balestra: alla termine del ciclo tecnologico, vengono sollecitate a flessione poco oltre il limite elastico in corrispondenza delle fibre più esterne delle foglie della balestra.

LA FATICA DA CONTATTO

La conoscenza del fenomeno trae le sue origini dalla teoria di Hertz (fine dell'800). Questi studiò in maniera analitica la distribuzione delle pressioni che si originano in corrispondenza degli strati superficiali e subsuperficiali di due corpi cilindrici premuti l'uno contro l'altro.

Riferiamoci allo schema di figura 12. In corrispondenza dell'asse di carico (asse z) si sviluppa uno stato di tensioni σ_x , σ_y e σ_z , che sono tensioni principali. Le tre tensioni sono tutte di compressione: il materiale compresso lungo l'asse z tende ad espandersi nelle direzioni x ed y, ma è impedito in questo dalle porzioni di materiale contiguo, indeformato perché al di fuori dell'area di contatto Hertziano [8].

In corrispondenza di un piano a 45° (rispetto alle tensioni principali) si registra la massima tensione tangenziale ad una distanza dalla superficie pari a circa 0.8 volte la semiampiezza a dell'area di impronta (vedi figura 13).

Se il carico esterno è applicato ciclicamente, lo stato di sforzo che si produrrà avrà le caratteristiche di un danneggiamento a fatica: sono quindi valide le stesse considerazioni espresse circa il danneggiamento a fatica ovvero circa la nucleazione di microfessurazioni discusse nel paragrafo precedente.

Essendo le tensioni principali benefiche ai fini della chiusura della cricca, il danneggiamento progressivo sarà imputabile, quasi esclusivamente, alla tensione massima tangenziale. Questa schematizzazione non tiene conto della possibilità di rotolamento di un corpo sul suo antagonista: in tal caso biso-

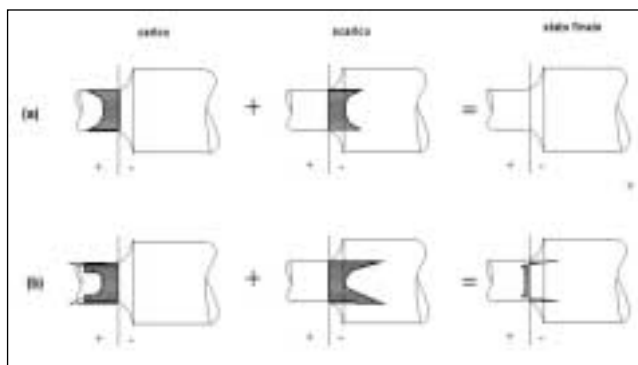


Fig. 11 – Schema del fenomeno di pre-stress: caricando oltre il limite elastico in maniera controllata, si producono sforzi residui benefici sulla superficie di interesse (a); componente senza pre-stress (b).

Fig. 11 – Scheme of the pre-stress: overloading just above the elastic limit, will induce residual compressive stresses at the surface (a); a not pre-stressed part (b).

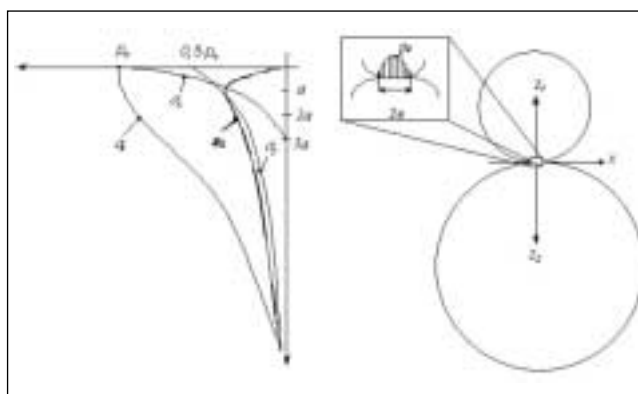


Fig. 12 – Andamento delle sollecitazioni originate in corrispondenza dell'asse di carico z in presenza di contatto Hertziano (puro rotolamento) in funzione della distanza dalla superficie.

Fig. 12 – Stress distribution along the load axis z generated by an Hertzian contact (rolling without sliding).

gnà considerare la presenza di tensione di taglio, τ_{yz} , localizzata ad una distanza dalla superficie pari a circa 0.5 volte la semiampiezza a dell'impronta spostati di una quantità pari a circa a dall'asse di carico z (vedi figura 14). Si noti come tale tensione cambi di segno quando, per effetto del rotolamento, il materiale attraversa l'asse di carico: la sollecitazione prodotta, cioè, sarà di tipo alternato. Tale sollecitazione, comunque, va a sovrapporsi alla τ_{45° prima accennata.

Lo schema descritto ben ricalca le condizioni di carico che si verificano all'interno di organi interessati da moti di puro rotolamento e, contemporaneamente, a trasferimenti di carico: camme con punteria a rotella, ingranaggi, cuscinetti volventi, ecc.

Dal momento, inoltre, che la superficie di un organo meccanico, finita di macchina utensile, possiede una certa rugosità, il contatto tra i due corpi in moto relativo avverrà in corrispondenza dei picchi della rugosità come già accennato nel paragrafo relativo al danneggiamento da usura.

Anche se la meccanica del contatto non cambia, l'entità degli sforzi cresce sensibilmente. In tal caso le microcricche tendono a generarsi a partire dalla superficie più esterna (qualche micron al di sotto dell'asperità) e a progredire verso le porzioni più interne del componente.

Nel caso degli ingranaggi⁽⁵⁾, il meccanismo di danneggiamento

⁽⁵⁾ Lo schema di ragionamento è valido almeno finché le condizioni di contatto consentono un moto di puro rotolamento, vale a dire in corrispondenza della primitiva del dente ed in assenza di strisciamento.

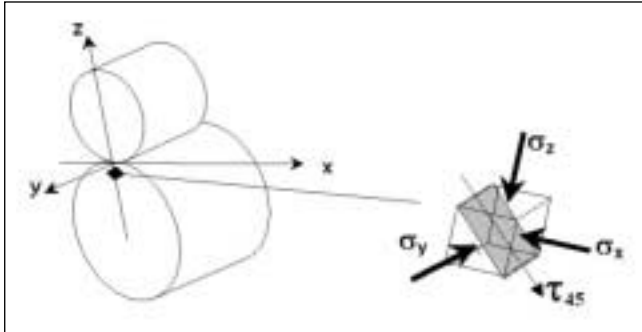


Fig. 13 - Stato di sforzo agente sul cubo elementare di materiale disposto lungo l'asse di carico z, al di sotto della superficie.

Fig. 13 - Indefinite state of stress originated below the surface over the load axis z.

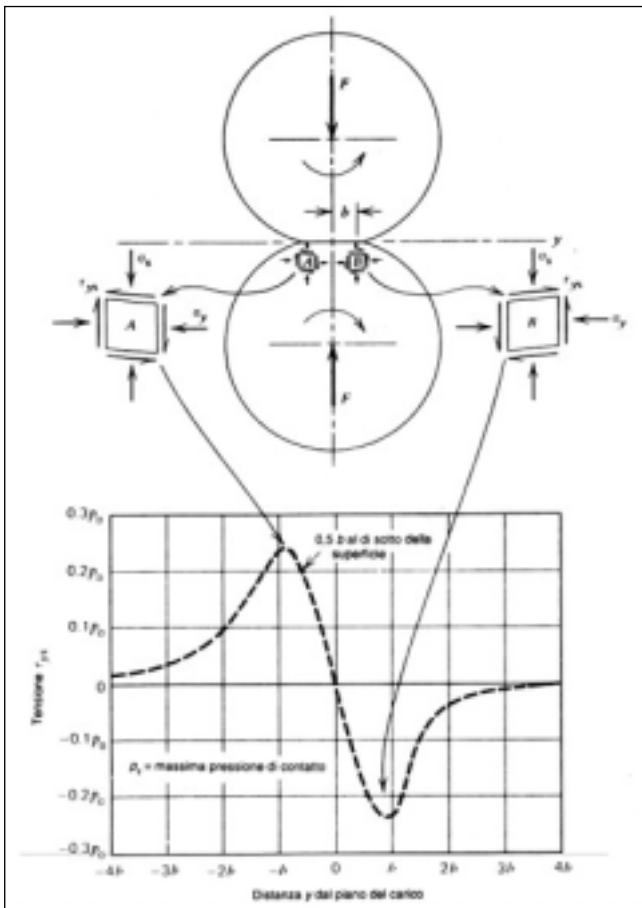


Fig. 14 - Andamento degli sforzi tangenziali τ_{tz} in presenza di rotolamento.

Fig. 14 - Shear stress τ_{tz} in presence of a rolling contact.

mento è funzione del tipo di trattamento termico o termochimico eseguito al fine di migliorare la durezza degli strati superficiali. Questa è la pratica comune affinché i denti dell'ingranaggio abbiano elevata resistenza ai fenomeni di usura, senza per questo indurre infragilimenti alla base del dente, punto più sollecitato per fatica flessionale.

Cementando o nitrurando la superficie, si ottiene comunque un incremento di durezza e resistenza entro i primi decimi di millimetro e, contemporaneamente, si manifestano elevate tensioni residue di compressione. Al di sotto di un certo spessore (maggiore in generale per gli strati cementati) le caratteristiche del materiale ritornano a conformarsi con quelle del cuore (core).

Nel caso della cementazione, lo stato di compressione è le-

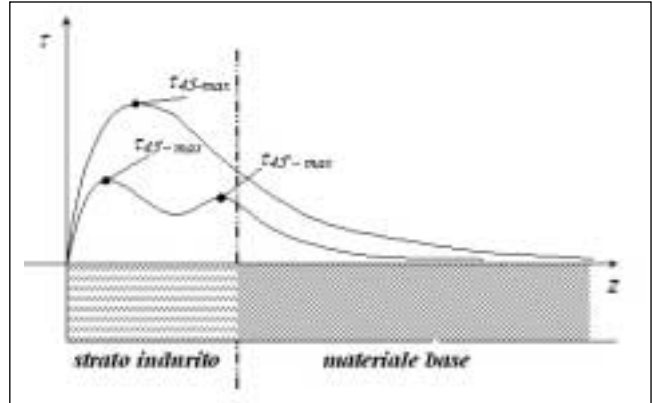


Fig. 15 - Confronto tra l'andamento della massima tensione tangenziale Hertziana da contatto e quella ottenuta tenendo conto del contatto Hertziano e delle sollecitazioni residue da trattamento termochimico.

Fig. 15 - A qualitative distribution of the maximum shear stress induced below the surface by an Hertzian contact in presence or not of residual stresses originated by thermochemical treatments.

gato all'incremento del tenore di carbonio in superficie. Durante la fase di carburazione vera e propria, la superficie adsorbe una certa quantità di carbonio. Con la successiva tempra, la trasformazione in martensite avverrà, in questi strati ricchi in carbonio, a temperature inferiori rispetto a quelle delle zone a cuore (tenori di carbonio più ridotti). La trasformazione strutturale austenite-martensite avverrà dapprima a ridosso dell'interfaccia cuore-superficie, procedendo successivamente sia verso la superficie che verso l'interno. Le ultime zone ad essere interessate alla trasformazione saranno gli strati più esterni.

L'aumento di volume legato alla trasformazione microstrutturale produrrà, quindi, un tensionamento residuo di compressione in superficie ed uno stato di tensionamento residuo a trazione (di entità molto minore, comunque) man mano che si avvanza negli strati più a cuore. Spesso un'eccessiva permanenza in atmosfera carburante (mirata ad incrementare oltremisura lo spessore dello strato cementato) è causa di effetti opposti, procurando l'insorgenza di tensioni residue di trazione [9, 10].

Diversamente accade per il trattamento di nitrurazione. Poiché la nitrurazione viene eseguita al di sotto delle temperature critiche di trasformazione ($\gamma \leftrightarrow \alpha$), non si hanno modificazioni della microstruttura del materiale base [11]. Le tensioni residue di compressione negli strati superficiali sono da imputare alla formazione di nitruri di ferro e/o degli altri elementi di lega con conseguente aumento locale del volume della massa metallica.

In presenza di contatto Hertziano e di tensioni residue di compressione l'analisi dello stato di sollecitazione finale prodotto segue lo schema qualitativo illustrato in figura 15. In relazione, ad esempio, alla massima tensione tangenziale (vedi figura 15), in presenza degli sforzi residui di compressione instaurati dal trattamento, si ottiene un decremento del suo valore massimo (picco da $\tau_{45\text{-max}}$ passa a $\tau_{45'\text{-max}}$). La comparsa di un secondo picco in corrispondenza all'interfaccia case-core è da associare all'inevitabile comparsa di tensioni residue di trazione qui indotte dal trattamento di cementazione/nitrurazione.

Questa prima analisi dà una giustificazione al ricorso di trattamenti di superficie per migliorare la resistenza del materiale e indurre uno stato tensionale residuo di compressione: l'obiettivo è sostenere le sollecitazioni di taglio (τ) prime responsabili per dell'innescio di rotture.

Focalizzando l'attenzione sulla zona subsuperficiale del contatto Hertziano (cioè tralasciando i contatti tra le asperità dei picchi della rugosità), si osserva che all'aumentare dei

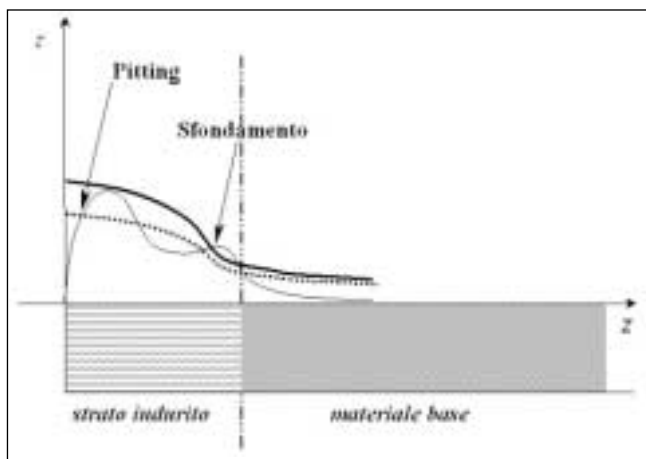


Fig. 16 – Schematizzazione dei fenomeni che provocano la formazione di pitting (linea tratteggiata) o di case-crushing (linea continua) in una ruota dentata trattata superficialmente.

Fig. 16 – Qualitative explanation of the damaging phenomena involved in pitting (dotted line) or case-crushing (continuous line) in a generic gear treated on surface.

carichi applicati, le τ massime aumentano e si spingono più in profondità.

Il tipo di danneggiamento indotto in una ruota dentata può schematicamente essere valutato sovrapponendo l'andamento della τ_{45} (tensione massima tangenziale) all'andamento della τ_{lim} (resistenza limite a fatica a taglio del materiale). Si veda in proposito la figura 16.

Qualora la curva di resistenza del materiale intersechi quella dei carichi applicati in prossimità della superficie, si incorrerà in fenomeni di pitting; nel caso l'intersezione tra le due curve si localizzi più in profondità, a ridosso dell'interfaccia, maggiore sarà la probabilità di innesco di microfratture correlabili allo sfondamento dello strato indurito (case-crushing).

Poiché la cementazione garantisce uno spessore indurito maggiore rispetto alla nitrurazione, si è soliti preferire questo trattamento termochimico quando le pressioni hertziane di contatto sono elevate. In tal modo si cerca di "far cadere" all'interno dello strato indurito i punti maggiormente sollecitati sotto la superficie (sempre secondo lo schema di figura 16).

Tuttavia, per certe condizioni di carico applicato, anche la normale nitrurazione è in grado di preservare il dente dell'ingranaggio dall'innesco di danneggiamenti per case-crushing. Si tenga presente, inoltre, che l'innesco delle cricche superficiali (pitting e micropitting) è assai differente nel caso di ingranaggi cementati rispetto ad ingranaggi nitrurati.

Nel caso della cementazione le cricche nucleate a partire dalla superficie solitamente producono danneggiamenti piuttosto estesi a causa di fenomeni di ramificazione secon-

daria (vedi figura 17a) mentre, per effetto della nitrurazione, si osservano scagliature di piccole porzioni di materiale che, generalmente, non progrediscono verso le porzioni più interne del dente (figura 17b [13]).

BIBLIOGRAFIA

- [1] K. Hiratsuka, M. Goto, Wear 238 2000 70-77
- [2] S.M Hsu, C.Shen, A.W. Ruff, Tribology Int. 30 No.5 1997 377-383
- [3] Garbar II, Tribology Int. 35 2002 749-755
- [4] S.C. Lim, M. F. Ashby, Acta Metall. 1987 35 1343-1348
- [5] N.P. Suh, Wear, 1973 25 111-124
- [6] J.F. Archard, W. Hirst, "The wear of metals under unlubricated conditions", Proc. R. Soc. 1956 A236 397-410
- [7] K. Hiratsuka, A. Sugahara, T. Sasada, Proc. of the 33rd Japanese Cong. Mater. Res., 1991 197-204
- [8] W. Nicodemi, Metallurgia, Masson, 1991, Milano, 64-65
- [9] R. Pedersen, S. L. Rice, SAE Trans., 69 1961 370
- [10] C. Dawes, R. J. Cookse, Heat Treatment of Metals, Special Report 95 1966 p.77.
- [11] G.Parrish, Heat Treatment of Metals, 2 1976 p.49.
- [12] H.C.Child, Engineering Design Guide No. 37, Publ. Oxford Univ. Press 1980.
- [13] S.J.Bull, J.T.Evans, B.A.Shaw, D.A.Hoffman, Engineering Tribology, 1999

— A B S T R A C T —

REQUIRED FEATURES FOR MECHANICAL PARTS: RESISTANCE TO WEAR, FATIGUE AND CONTACT FATIGUE

KEYWORDS: wear, fatigue, contact fatigue, pitting

Designing of mechanical parts covers many basic aspects of mechanical engineering. A proper choice of material, coupling with the static and the dynamic designing, follows nowadays well consolidated criteria, often suggested by experience or prescribed by normatives. New frontiers have been exploring to best optimize design of mechanical parts, focussing on all those features capable to extend life of components, such as the fatigue, the contact fatigue and the wear behaviour (just avoiding a pointless over-size dimensioning). Not considering the ruptures for over-loading, those ones enunciated above are the main causes of out-services of mechanical parts. Aim of this paper is to discuss about the mechanisms involved in such damaging phenomena, highlighting the way the drive parameters selected can act to realize a well optimized design.

Fig. 17 – Pitting superficiale in una ruota dentata cementata (a) e in una nitrurata (b).

Fig. 17 – Superficial pitting resulted: carburized gear (a); nitrided gear (b).

