

# IL PROBLEMA DELL'USURA NEGLI ORGANI MECCANICI

L'usura è sicuramente uno dei principali fenomeni da prevedere e controllare nella progettazione e messa in esercizio dei componenti meccanici perché, se mal progettati, ne possono venire danneggiati tanto da comprometterne prematuramente la funzionalità

**A** ttrito ed usura sono spesso interpretati in qualità di sinonimi. Sebbene strettamente interdipendenti, più propriamente essi devono essere considerati l'uno l'inevitabile conseguenza dell'altro.

L'attrito è un fenomeno inevitabile quando si hanno due materiali a contatto diretto; per sua causa le forze in gioco in opposizione al moto sono le principali responsabili della perdita di efficienza di organi in movimento relativo tra loro; se mal controllato, esso si tradurrà in una perdita di prestazioni su larga scala, causando, ad esempio, un eccessivo consumo di carburante nei motori a combustione interna. Inoltre, vista la particolare fenomenologia coinvolta, l'energia dissipata si traduce direttamente in calore, che, facendo aumentare la temperatura dei materiali a contatto, spesso ne modifica in maniera preponderante le caratteristiche fondamentali. Nella accezione più elementare con il termine di usura si suole invece indicare quella progressiva perdita di materiale causata dal moto relativo di due corpi a diretto contatto. L'effetto è quello di una modificazione progressiva della morfologia delle superfici, in grado di condurre in breve tempo al definitivo disservizio del componente meccanico. L'approccio con cui attrito ed usura sono studiati, è, quindi, sostanzialmente diverso.

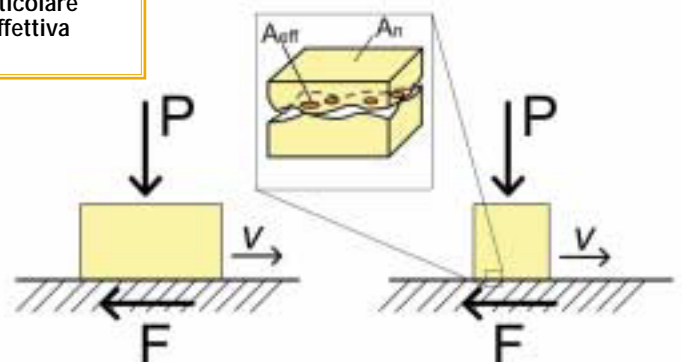
## L'ATTRITO E LO SCHEMA A DEFORMAZIONE PLASTICA

Due sono le leggi classiche (ric conducibili ancora ai primi studi fatti da Leonardo da Vinci e Amontons) che spiegano il fenomeno dell'attrito in funzione di parametri

macroscopici: la prima legge indica che la forza di attrito è proporzionale alla componente normale del carico applicato sulla superficie, la seconda stabilisce l'indipendenza di tale forza dall'estensione della superficie di contatto. Globalmente esse sono espresse dalla ben nota equazione  $F = \mu \cdot P$ , che lega proporzionalmente la forza di attrito  $F$  al carico normale  $P$  per mezzo del coefficiente di attrito  $\mu$  [1].

La legge di proporzionalità appena espressa parrebbe celare due apparenti contraddizioni; due corpi, dello stesso materiale, che vengano premuti su di un piano da due forze di pari entità  $P$ , ma che abbiano superfici di contatto di diversa estensione, realizzano due coppie tri-

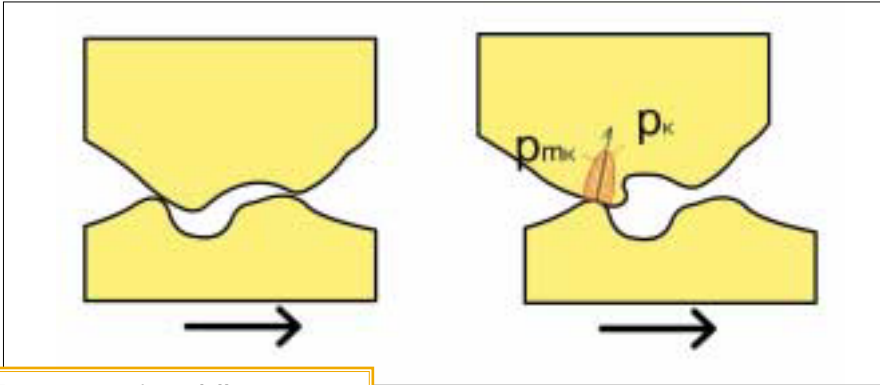
1. Schema delle forze in gioco nel contatto tra due corpi, con superfici di contatto nominali diverse; particolare della area effettiva di contatto.



bologiche caratterizzate dallo stesso coefficiente d'attrito  $\mu$  e quindi saranno soggette alla stessa forza resistente  $F$  (figura 1). Per di più la legge succitata pare non tenere conto della finitura superficiale, non essendoci alcun parametro che la consideri.

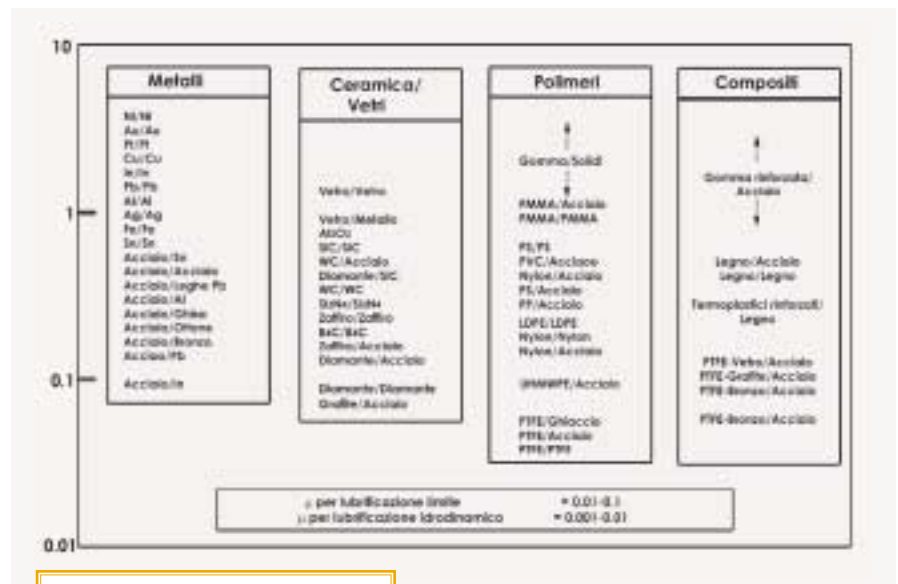
nominale  $A_n$ . Di conseguenza si generano sempre delle pressioni locali che risultano statisticamente superiori al valore medio del limite di plasticizzazione  $p_m$  delle asperità del materiale<sup>2</sup>. Tale carico specifico porta a deformazione plastica le creste in contatto tra loro<sup>3</sup>, con la conse-

Tuttavia tale schema va sovrapposto ad un altro, che, al contrario, tiene conto della effettiva morfologia della superficie. Infatti le asperità superficiali sono sollecitate statisticamente da una pressione ora superiore a  $p_{mk}^4$ , ora inferiore a tale limite; pertanto un certo numero di asperità si comporterà secondo lo schema plastico, altre subiranno semplicemente una deformazione elastica. Queste ultime saranno responsabili di un mutuo ancoraggio, contribuendo in maniera competitiva al fenomeno della frizione. Nel caso in cui la rugosità superficiale sia ragionevolmente contenuta entro i limiti dettati dalle normali operazioni di finitura dei pezzi, il contributo ai fenomeni di attrito dello schema per ancoraggio delle asperità sarà certa-



**2. Rappresentazione della deformazione plastica e al contatto per superamento della pressione di plasticizzazione  $p_{mk}$  locale.**

In altre parole ci si aspetterebbe che la forza  $F$  d'attrito dipenda non dal carico totale  $P$ , ma dalla sua distribuzione in termini di pressioni specifiche per unità di superficie, includendo in tal modo sia il concetto di superficie di contatto effettiva  $A_{eff}$ , sia la morfologia (e quindi la finitura superficiale) di tale contatto. Il presupposto è che, in virtù proprio della rugosità superficiale, il contatto tra due corpi avvenga attraverso una porzione ridotta della superficie



**3. Valori per i coefficienti di attrito dinamico per alcune classi di materiali.**

<sup>1</sup> In seguito Coulomb fece distinzione tra l'attrito di natura statica da quello di tipo dinamico, osservando che la forza occorrente per tenere in moto relativo un corpo rispetto ad un suo antagonista era nettamente inferiore rispetto la analoga forza impressa da fermo, a causa di una diminuzione del coefficiente di attrito dinamico  $\mu_d$  rispetto quello statico  $\mu_s$ .

<sup>2</sup> In prima approssimazione si suppone che il materiale segua un comportamento pressoché elasto-plastico, senza marcati fenomeni di incrudimento.

<sup>3</sup> La deformazione avviene a danno del materiale con le caratteristiche meccaniche più basse, qualora si considerino materiali a contatto diversi oppure dotati di diverse caratteristiche locali ingenerate da svariati fenomeni, quali incrudimento, ossidazione, ecc.

<sup>4</sup> Il pedice  $k$  sta ad indicare il  $k$ -esimo contatto formato.

guente giunzione per mezzo di una saldatura fredda (figura 2). Definita  $\tau_m$  la resistenza media allo scorrimento di tali ponti, la forza risultante di attrito può essere definita dal prodotto, ed infine potendosi esprimere il coefficiente di attrito mediante la:

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{A_{eff} \cdot \tau_m}{A_{eff} \cdot p_m} = \frac{\tau_m}{p_m} \quad (1)$$

si conclude che esso dipende effettivamente dalle caratteristiche dei materiali di accoppiamento.

mente trascurabile; diversamente sarà per superfici con finitura grossolana. Inoltre, come si vedrà più avanti, la rugosità superficiale interviene attivamente come parametro fondamentale che governa il danneggiamento da usura, vale a dire la progressiva perdita di materiale in funzione di uno strisciamento. In linea di principio, viste le conclusioni fatte circa la eq.1, è possibile determinare in prima approssimazione il coefficiente d'attrito di una coppia tribologica note che siano soltanto le proprietà meccaniche dei materiali. Infatti, semplificando lo schema di contatto rappresentato in figura 2, la cresta si deformerà plasticamente

laddove il materiale sarà sottoposto ad uno sforzo di trazione superiore al carico di snervamento  $\sigma_{sn}$ . Di conseguenza lo sforzo a scorrimento  $\tau_m$  potrà essere assimilato al valore limite a scorrimento plastico  $\tau_{sn}$ ; per il criterio di Tresca, tale valore risulta anche uguale a  $\sigma_{sn}/2$ . In definitiva, sostituendo nella eq. 1, avremo:

$$\mu = \frac{\tau_m}{P_m} \cong \frac{\tau_{sn}}{\sigma_{sn}} = \frac{\sigma_{sn}/2}{\sigma_{sn}} = 0.5 \quad (2)$$

Tale valore è prossimo a quello sperimentale ottenuto per coppie tribologiche formate da metalli di normale impiego, ceramici o vetri, in assenza di lubrificazione (figura 3).

Per coppie formate da metalli puri, invece, si ottengono valori superiori a 0.5; tale comportamento è imputabile tanto alle caratteristiche meccaniche, quanto alle caratteristiche fisiche del materiale. Infatti tali coppie sono caratterizzate sia da bassi carichi di snervamento, sia da una saldatura delle giunzioni favorita dalla notevole affinità chimica<sup>5</sup> e da basse temperature di fusione del materiale a contatto.

Inoltre è da non trascurare l'effetto benefico apportato dai normali fenomeni ossidativi che interessano molti metalli. La formazione di strati d'ossido uniformi e compatti sulla zona superficiale a contatto permette di ridurre la plasticizzazione all'apice delle asperità, con conseguente riduzione del coefficiente d'attrito al di sotto del valore medio di 0.5 (figura 4).

È bene ribadire, tuttavia, che tutte queste considerazioni devono essere rivisitate ed interpretate secondo la natura statistica del fenomeno. È in tal caso comprensibile come per una coppia Au/Au, caratterizzata da bas-

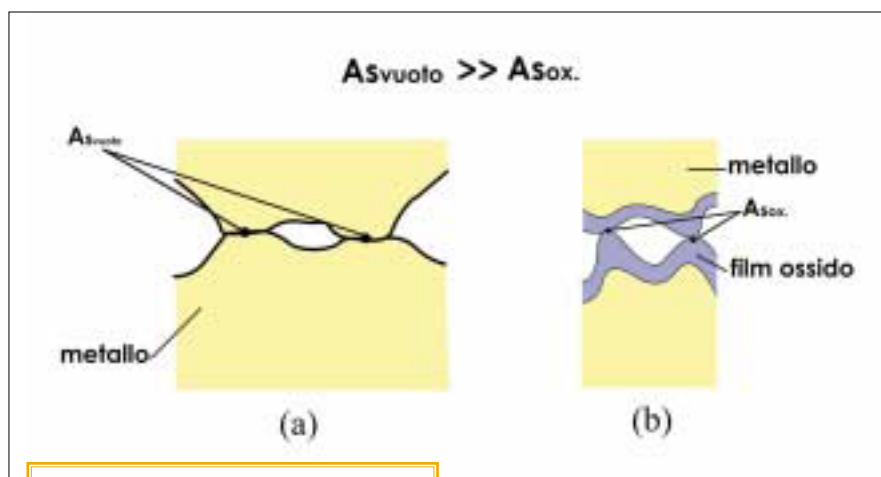
si valori di  $\sigma_{sn}$  e di  $\tau_{sn}$ , l'alta deformabilità del materiale in gioco produrrà una elevata area effettiva di contatto, e di conseguenza genererà un notevole numero di zone micro-saldate. Globalmente sarà pertanto facile che siano superati i valori medi di  $\rho_m$  e  $\tau_m$  determinando così su macroscala un notevole incremento del coefficiente di attrito. Di contro, in coppie acciaio/acciaio induriti superficialmente, quali ad esempio camme e ingranaggi cementati, si hanno elevati  $\sigma_{sn}$  e  $\tau_{sn}$  con una ridotta area di contatto effettiva; quindi, pur es-

i corpi facenti parte del sistema tribologico. Il progredire del danno è determinato dalla più o meno graduale asportazione dello strato più esterno di materiale.

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

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

Nel caso di usura adesiva, risulta valido ancora lo schema preso in considerazione in figura 1, con la pro-



4. Rappresentazione schematica del confronto in termini di aree effettive di contatto tra due superfici metalliche in vuoto ed in ambiente ossidante.

sendo le pressioni molto elevate, esse statisticamente supereranno i valori di plasticità del materiale soltanto in pochi punti, con il risultato di contenere i valori di  $\mu$ .

Infine, in presenza di materiali duri rivestiti da film sottili particolarmente duttili si ottiene una generale diminuzione del coefficiente di attrito. La spiegazione sta nel fatto che, in virtù dell'elevata durezza del materiale base, l'area effettiva di contatto sarà piccola. È questo il caso delle bronzine interposte nel contatto radente tra organi in acciaio speciale da costruzione.

#### L'USURA E IL DANNEGGIAMENTO SUPERFICIALE

In genere il fenomeno del danneggiamento per usura si manifesta macroscopicamente con la modifica dello stato superficiale di uno o di tutti

gressiva asportazione di materiale in corrispondenza dei ponti microsaldati.

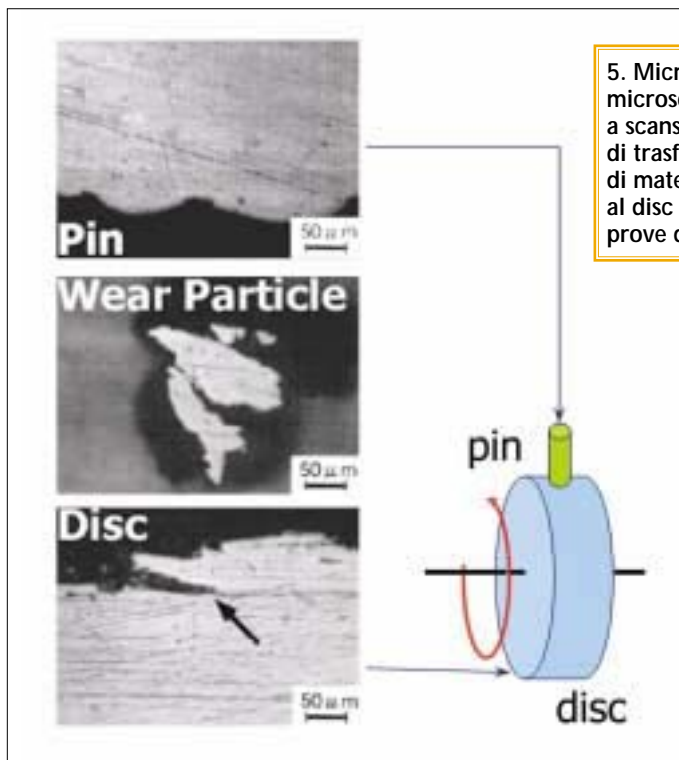
L'usura di tipo abrasivo si verifica allorché si è in presenza di un terzo corpo dotato di maggior durezza che va ad interporsi tra le superfici a contatto: l'azione di asportazione di materiale è causata dalla abrasione della/e due superfici.

In particolari ambienti ossidativi<sup>6</sup> l'azione di erosione è affidata soprattutto al formarsi del deposito di ossido sulle zone corticali della superficie. Da specificare, tuttavia, che in tale caso non si vuol far rientrare il fenomeno della uniforme ossidazione della superficie del componente descritto nel paragrafo precedente; piuttosto si tende a raggruppare all'interno di questa casistica quei particolari fenomeni ossidativi localizzati (nel contatto cresta/cresta), nonché quegli strati ossidati che risultano facilmente scagliabili.

Infine per usura in presenza di fusione, si presuppone sempre valido lo schema plastico del contatto cre-

<sup>5</sup> Tale risultato sta alla base anche del processo ben noto di saldatura per frizione di acciaio su acciaio, del grippaggio di organi meccanici che sono realizzati dalla coppia Al/Al, ecc.

<sup>6</sup> Come meglio descritto nel seguito della trattazione, tale ambiente si può verificare anche in presenza di atmosfere consuete (es. aria) nel caso in cui però ci siano condizioni operative particolarmente drastiche.



5. Micrografie al microscopio elettronico a scansione: meccanismi di trasferimento di materiale dal pin al disc rilevato durante prove di usura.

la progressione del danno secondo lo schema abrasivo dopo che l'innesco del fenomeno ha seguito uno schema di tipo adesivo.

A titolo di esempio, una simile situazione è ben evidenziata in figura 5, nella quale è riportato il risultato di una prova di usura pin-on-disc [2]. Le particelle di materiale provenienti dall'elemento pin si saldano sulla superficie del disco: ben visibile è infatti la linea di separazione tra la particella plasticizzata trasferita e la superficie antagonista. 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 capaci di amplificare il fenomeno abrasivo interponendosi tra i due corpi a contatto.

Il tutto è validato anche dall'andamento del gradiente delle durezze in funzione della distanza dalla superficie di contatto tra i due corpi del sistema pin-on-disc (figura 6). I punti all'interno del riquadro rappresentano i dati di durezza relativi agli strati superficiali del pin e delle particelle asportate. In presenza di ossigeno, i valori di durezza misura-

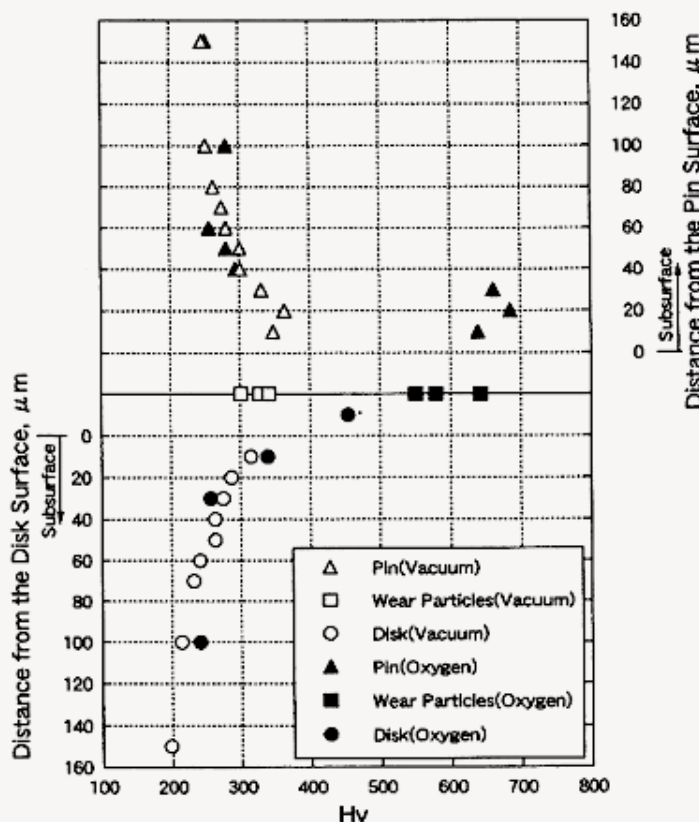
sta/cresta, ma rivisitato in condizioni talmente drastiche da produrre in corrispondenza delle asperità in contatto una fusione del materiale molto più in profondità.

In definitiva appare evidente come i fenomeni coinvolti nel danneggiamento delle superfici dipendono strettamente dalle caratteristiche termo-meccaniche dei corpi costituenti il sistema tribologico.

Ad esempio, in presenza di contatto tra due corpi dotati di pari durezza nominale (in scala microscopica), ci si aspetta che le superfici in uno schema ad usura adesiva si danneggino con la stessa cinetica. Non di rado, tuttavia, ci si imbatte in stati di usura differenziata per i due componenti, sia per quanto concerne la tipologia (adesiva, abrasiva, ecc.) sia per l'entità del danno prodotto. I componenti in acciaio possono essere soggetti localmente a cicli termici molto diversi. Le particelle asportate per fenomeni adesivi (come precedentemente discusso in dettaglio) possono a loro volta subire drastici raffreddamenti diversi a se-

conda di particolari condizioni di lavoro, quali ad esempio variabilità delle velocità di strisciamento e dei carichi applicati. Queste stesse particelle, incrudite proprio a causa di veri e propri trattamenti di tempra, potranno agire da terzo corpo, con

6. 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.





ti sulle particelle asportate e quelli relativi ai primi strati del pin sono molto prossimi. Non così marcato è, invece, il gradiente di durezza rilevato nelle zone subsuperficiali del disco e del pin. Quindi il trasferimento di materiale dal pin al disco induce effettivamente sulla superficie di quest'ultimo un certo incremento di durezza. La superficie più esterna del pin è caratterizzata da durezza comparabili con quella delle particelle scalzate, per fenomeni di incrudimento per plasticizzazione [3-4].

Dal punto di vista fenomenologico, quindi, il meccanismo che porta all'usura di una superficie non risulta spesso facilmente classificabile secondo le tipologie prima enunciate. Tanto lo schema dell'usura adesiva che quello dell'usura abrasiva entrano in gioco su scala microscopica fino a provocare il danneggiamento su scala macroscopica.

Tutto questo lascia intuire quali difficoltà si incontrerebbero nel voler stabilire quanta parte del danneggiamento possa essere imputata a fenomeni di tipo adesivo piuttosto che a quelli abrasivi, ossidativi, ecc.

### LA VALUTAZIONE DELL'USURA SECONDO L'APPROCCIO DEL DANNEGGIAMENTO PRODOTTO

Alla luce delle problematiche fin qui esposte, appare più chiaro il motivo per il quale negli ultimi anni si sta cercando di correlare tra loro i macro-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.

Inoltre il costante tentativo di costruire modelli revisionali affidabili capaci di prevedere il comportamen-

to 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:

$$(4) \quad V = K \cdot P / R_s$$

o in alternativa:

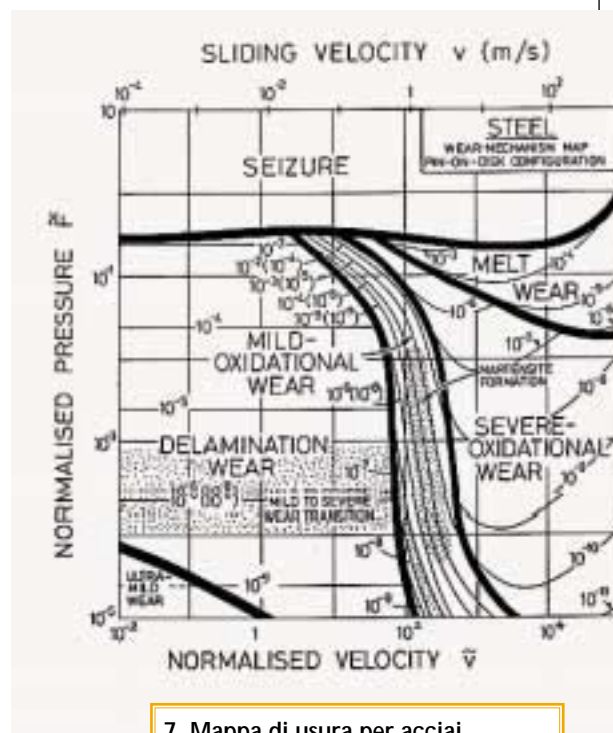
$$(5) \quad V = K \cdot A_c \cdot s$$

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 del materiale (carico unitario 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 7.

In ascissa e in ordinata vi sono le due grandezze macroscopiche del fenomeno (carico applicato e velocità di strisciamento), rese in forma adi-



7. Mappa di usura per acciai al carbonio, in assenza di lubrificazione (prove pin-on-disc).

mensionale<sup>7</sup>. 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 strisciamento inferiori a circa 1 m/s, la temperatura al contatto non raggiunge valori rilevanti in grado di

<sup>7</sup> Più precisamente si tratta della velocità normalizzata  $\bar{v} = v \cdot r_0 / a$  (con  $v$  velocità di strisciamento,  $r_0$  raggio del pin,  $a$  diffusività termica) e della forza normalizzata  $\bar{F} / (A \cdot H_0)$  (dove  $F$  è la forza nominale di contatto,  $A$  l'area nominale di contatto ed  $H_0$  la durezza superficiale a temperatura ambiente).

promuovere importanti fenomeni ossidativi (temperatura di flash).

L'inevitabile formazione di un sottile film di ossido funge, in questo caso, 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*). 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 [5-6].

L'aumento progressivo del carico porta alla rottura direttamente dello strato di ossido: i carichi locali raggiungono valori tali da indurre il contatto diretto tra le parti metalli-

che antagoniste. Queste a loro volta saranno soggette a nuova ossidazione e successiva rottura, innescando inevitabilmente un processo di deterioramento progressivo [7-8].

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*).

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 dei 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 estremamente 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. Contemporanea-

mente le elevate temperature in gioco provocano un'ulteriore accelerazione dei fenomeni ossidativi, con incremento notevole della cinetica di danneggiamento.

## CONCLUSIONI

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 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), non dimeno 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 discusso in precedenza.

D'altra parte non trascurabili sono gli effetti dannosi indotti da una carburazione condotta in forno con potenziale di carbonio 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<sup>8</sup>.

M. Boniardi, F. D'Errico,  
Politecnico di Milano,  
Dipartimento di Meccanica.

<sup>8</sup> 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.

## BIBLIOGRAFIA

[1] F.P. Bowden, T. Tabor, *The friction and lubrication of solids*, Oxford Clarendon Press, 1954.

[2] K. Hiratsuka, M. Goto, *Wear* 238 2000 70-77.

[3] S.M Hsu, C. Shen, A.W. Ruff, *Tribology Int.* 30 No.5 1997 377-383.

[4] Garbar II, *Tribology Int.* 35 2002 749-755.

[5] N.P. Suh, *Wear*, 1973 25 111-124.

[6] S.C. Lim, M. F. Ashby, *Acta Metall.* 1987 35 1343-1348.

[7] J.F. Archard, W. Hirst, *The wear of metals under unlubricated conditions*, Proc. R. Soc. 1956 A236 397-410.

[8] K. Hiratsuka, A. Sugahara, T. Sasada, *Proc. of the 33<sup>rd</sup> Japanese Cong. Mater. Res.*, 1991 197-204.