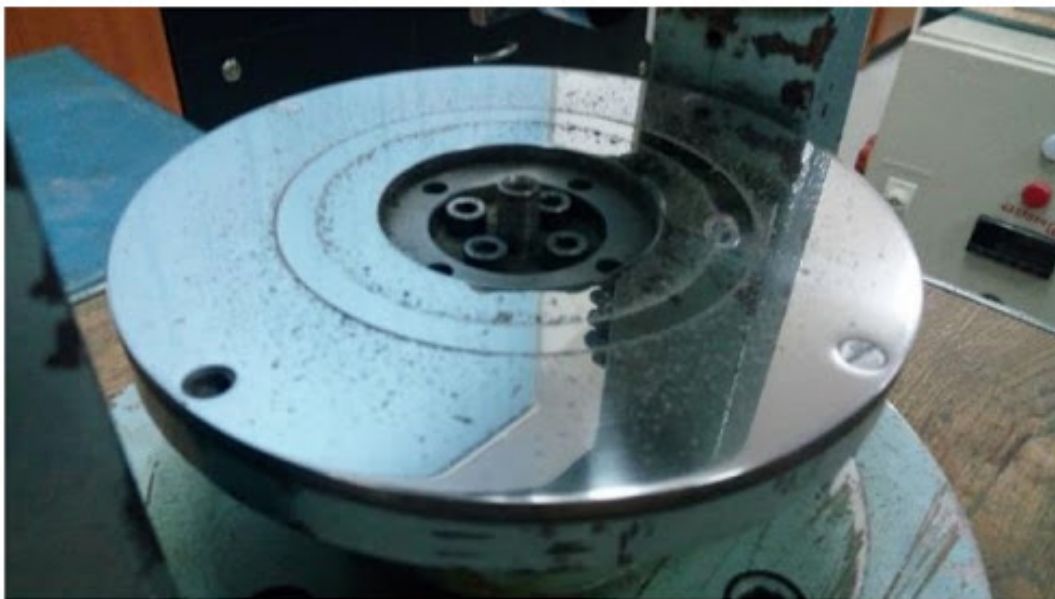


La progettazione dei sistemi meccanici

Parte 4 – I criteri di Progetto: Stabilità



Cattedra di Progetto di Macchine

Rev 1.0 – A.A. 2019/2020

1 Criteri di Progetto: la Stabilità

Per **Stabilità** di un sistema meccanico si intende in generale la sua capacità di conservare, durante il normale esercizio, entro prefissati limiti di tolleranza le sue caratteristiche funzionali .

Le caratteristiche funzionali del sistema meccanico sono determinate dal processo tecnologico posto in essere e dalla consistenza e struttura dei componenti il sistema.

La valutazione della stabilità del processo tecnologico può essere definita mediante tecniche che dipendono, di volta in volta, direttamente dal processo in esame : non si può in questa sede indicare metodi di analisi di validità generale.

La consistenza e la struttura dei componenti il sistema, oltre che dal punto di vista delle caratteristiche tecnologiche e funzionali richieste dalla specifica applicazione, può essere in generale valutata, ai fini della stabilità, dai punti di vista della **resistenza**, della **deformazione** e della **durata**.

Affronteremo nei prossimi capitoli il punto di vista della durata, lasciando resistenza e deformazione alle trattazioni specifiche di altri corsi.

1.1 Durata

Ai fini della valutazione della stabilità di un organo meccanico, dal punto di vista della durata, si prendono in esame, come fenomeni di carattere generale, gli effetti della fatica e dell'usura sulla resistenza meccanica del particolare.

Per altro ad ogni situazione particolare corrispondono condizioni funzionali oggettive che possono richiedere indagini peculiari in relazione alla definizione della durata del sistema.

1.1.1 Fatica

Quando un organo meccanico è soggetto ad uno stato di sollecitazione periodicamente variabile nel tempo, si dice che è sottoposto a fatica.

Il comportamento del materiale in queste condizioni è tuttora ignoto, benché si sia individuato l'effetto della fatica in un progressivo collasso intercristallino nella zone periferiche della sezione resistente, che riduce via via la sezione stessa, fino a renderla insufficiente a sopportare il carico.

Esempio notevole è quello delle pale Pelton, le quali sono soggette di continuo all'azione centrifuga, ma solo periodicamente a quella flettente prodotta dal getto. Il getto agisce totalmente su una pala durante l'arco di piena azione che vale 19° , contro i 360° dell'intero

giro. L'esperienza annovera un elevatissimo numero di avarie nei casi in cui la radice della pala è calcolata sia pur prudenzialmente a tensoflessione secondo i criteri precedentemente citati; tanto che è risultato necessario limitare la σ ammissibile a $2 + 3 \text{ kp/mm}^2$, cioè con un coefficiente di sicurezza alcune decine.

Tutte le sperimentazioni condotte in argomento hanno fatto riferimento a sollecitazioni di forma sinusoidale distinte dai seguenti valori:

- σ_m = valor medio della sollecitazione
- $\Delta\sigma$ = ampiezza sella sollecitazione
- f = frequenza della sinusoidale

distinguendo essenzialmente tre diverse modalità di carico indipendentemente dalla frequenza:

- $\sigma_m > \Delta\sigma / 2$ = carico pulsante
- $\sigma_m = \Delta\sigma / 2$ = carico all'origine
- $\sigma_m = 0$ = carico in oscillazione

FIG 1

Le prime prove sperimentali in merito furono condotte da Wohler (1857-69) e risultano tuttora valide. Furono ottenute sottoponendo provini cilindrici a carichi sinusoidali dei tre tipi sopra indicati.

Le curve esprimono l'andamento della tensione di rottura in funzione del numero di cicli di sollecitazione. Sono caratterizzate da forte dispersione, vanno quindi interpretate secondo metodi statistici. Naturalmente ad ogni materiale, ad ogni tipo di sollecitazione e ad ogni valore di σ_m e $\Delta\sigma$, corrisponde una curva.

In genere tali curve si rappresentano in un piano semilogaritmico, dati gli altri valori che può assumere N.

Riferendosi ad una prova realmente condotta su provini ricavati per lavorazione meccanica da una piastra di 20 mm di spessore si citano a titolo di esempio i seguenti valori:

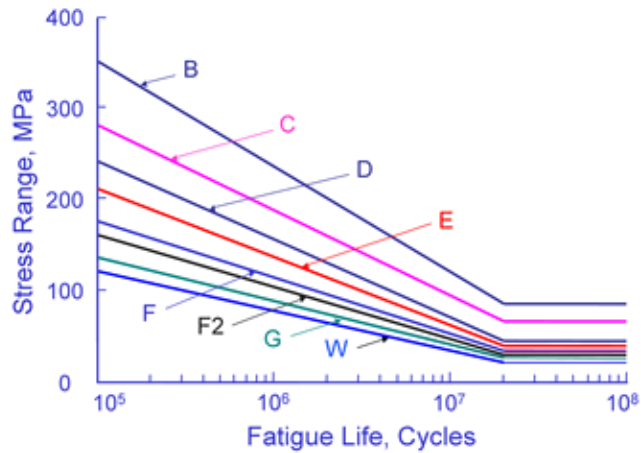
- all'inizio la resistenza a fatica eguaglia la $\sigma_R = 41 \text{ kp/mm}^2$
- dopo 10 cicli si riduce a 18 kp/mm^2 .

I risultati di Wohler furono:

- - N è tanto più grande quanto minore è $\Delta\sigma$
- - per ogni $\sigma_s < \sigma_R$ esiste un σ_i (ovvero un $\Delta\sigma$) che non provoca rottura
- - per ogni $\sigma_m < \sigma_R$ esiste un $\Delta\sigma$ che non provoca rottura

Lavorando nel tratto orizzontale della curva la resistenza è indefinita e si definisce resistenza originaria; essa si raggiunge dopo alcuni milioni di cicli per gli acciai e dopo (da 30 a 500) 10^6 cicli per le leghe leggere.

E' evidente a questo punto la correlazione esistente tra numero di cicli e durata tramite la frequenza.



I risultati di Wohler furono interpretati da Launhardt e Weyrauch nella formula non certo precisa ma orientativamente valida per gli acciai :

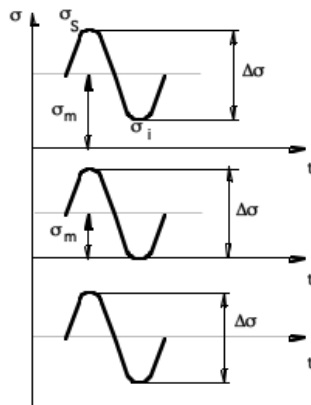
$$\sigma_F = \frac{2}{3} \sigma_R \left(1 \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_{|l}}{\sigma_{|l}} \right)$$

con $\sigma_{|l}$ = la tensione che risulta inferiore in valore assoluto

e $\sigma_{|l}$ = la tensione che risulta superiore in valore assoluto

Se ne deduce che:

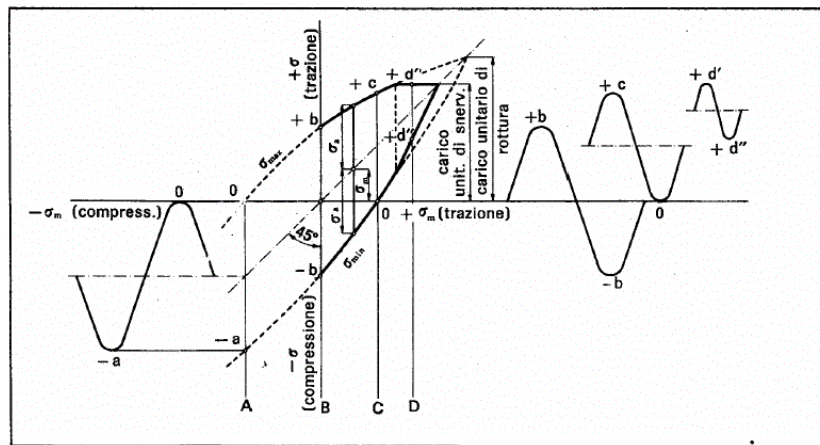
- quando $\sigma_i = \sigma_s$ (carico statico) $\sigma_F = \sigma_R$
- quando $\sigma_i = 0$ (carico all'origine) $\sigma_F = 2/3 \sigma_R$
- quando $\sigma_i = -\sigma_s$ (oscillazione) $\sigma_F = 1/3 \sigma_R$



Il rapporto 1:2:3 fra le tre resistenze a carico statico, all'origine, in oscillazione, corrisponde al criterio di Bach e benché soltanto orientativo può essere impiegato per dedurre il comportamento a fatica degli acciai quando non si conosca altro che il valore di σ_R .

Si osserva che dai valori delle tre resistenze sopra citate è possibile dedurre il comportamento del provino per qualunque coppia $\sigma_m - \Delta\sigma$. Infatti al variare di σ_m le tensioni σ_i e σ_s di sicurezza variano secondo un diagramma simile ad un ciclo di isteresi che per gli acciai è centrosimmetrico.

Smith propose di tagliare le parti del diagramma che superano lo snervamento e di assimilare i lati curvilinei con spezzate. Il diagramma di Smith vale per un solo tipo di sollecitazione monoassiale: ad esempio presso-tensione.



Quanto detto vale per stati monoassiali di tensione, diversamente il problema risulta assai arduo. E' quindi necessario ammettere ipotesi non si sa quanto attendibili riguardo alla stabilizzazione delle tensioni principali. In queste condizioni si usa fare riferimento a leggi empiriche non prive di qualche attendibilità "a posteriori".

Ad esempio:

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)^2 = 1 \quad \text{per acciai}$$

dove σ_0 e τ_0 sono resistenze all'origine rispettivamente per trazione e torsione pura.

1.1.2 Usura

L'usura è la rimozione di materiale dalla superficie di un solido risultante da un'azione meccanica. Si tratta in genere di piccole quantità di materiale rimosso, tanto che il fenomeno benché importante è scarsamente vistoso: un'automobile del peso di 1000 kg può diventare

inservibile per usura quando la diminuzione di peso è di appena pochi grammi! Ciò è dovuto alle ridotte tolleranze che oggi hanno certe lavorazioni. Una volta le macchine alternative a vapore a bassa pressione avevano giochi tra cilindro e stantuffi di parecchi millimetri e quindi anche un'usura dell'ordine del mm aveva scarsa importanza. Oggi i MCI ammettono tra cilindro e stantuffo un gioco dell'ordine di 2.5 centesimi di mm e conseguentemente il cattivo funzionamento si denuncia quando l'usura si spinge oltre qualche centesimo di mm. Per questo oggi l'usura è argomento di imponenti studi sistematici in sede teorica e sperimentale, resi possibili dall'affinamento delle tecniche di misura. Le indicazioni desunte da tali studi sono di primaria importanza per la corretta impostazione del progetto dei sistemi meccanici per i quali è necessario prevedere il comportamento durante l'intero ciclo di vita.

1.1.2.1 Tipi di usura

Si classifica l'usura in 4 categorie e per ciascuna la meccanica del fenomeno è ormai discretamente chiarita, sia pure qualitativamente. Le leggi che governano il fenomeno sono sempre di natura statistica e quindi interpretabili in termini di "tempo di sopravvivenza" in certe condizioni operative. Spesso un tipo di usura può produrne un altro.

a) l'usura adesiva

E' la più frequente ed importante. Quando due superfici strisciano, o anche semplicemente sono a contatto, l'una sull'altra, si produce un contatto intimo tra le punte delle asperità. Si creano numerosissime microsaldature che, procedendo il moto, ovvero distaccando i corpi, vengono strappate.

Con opportune termocoppie è stata misurata (BARBAS) una temperatura locale, della durata di pochi μ s, anche di 1000 °C con velocità relative di dell'ordine di 3 m/s. All'atto dello strappo minuti frammenti di un solido rimangono aderenti all'altro, talvolta addirittura in forma di soluzione solida. Nel proseguire del fenomeno tali frammenti possono anche essere restituiti alla superficie originaria o rotolare formando particelle libere.

I legami che producono l'adesione sono a livello atomico, tant'è che molta importanza ha il raggio atomico (come si vedrà) dei metalli a contatto. Questo tipo di usura è sempre presente; può essere ridotto, ma non eliminato.

b) l'usura abrasiva

Si ha quando una superficie dura striscia su di un'altra relativamente più tenera, giacché le asperità della prima scalfiscono la seconda come un utensile. Il materiale asportato forma in genere frammenti liberi. L'usura abrasiva è molto distruttiva. La si riduce lappando le superfici ed evitando la presenza di particelle dure e libere.

c) l'usura corrosiva

Ogni materiale è attaccato chimicamente dall'ambiente . Sovente il prodotto dell'attacco è un ossido che peraltro, una volta formato, protegge il materiale dall'ulteriore attacco. L'usura corrosiva è di tipo chimico perché nello strisciamento di due superfici lo strato protettivo viene asportato e consente il rinnovo dell'attacco chimico. L'usura corrosiva si combatte impiegando materiali resistenti agli agenti chimici dell'ambiente e proteggendo le superfici con lubrificanti.

d) l'usura per fatica superficiale

Si produce tra superfici prevalentemente rotolanti più che striscianti. Nel ritmico ciclo del ricalcamento ripetuto per carico e scarico si provocano sotto le superfici cricche che procedono isolando frammenti di materiale che si liberano dal materiale cui appartenevano. Spesso questo tipo di usura passa inosservato quando sono presenti altri tipi più rapidi. Ad esempio negli accoppiamenti camma-ruolo in cui l'usura adesiva e abrasiva sono più rapidamente distruttive. In certi casi essa è però essenziale: ad esempio nel caso delle strade soggette a traffico di automezzi. Sembra dimostrato che in questo caso l'usura per fatica superficiale del manto è proporzionale alla 5° potenza (!) del carico.

A commento di quanto detto si può concludere che la più pericolosa di tutte le forme di usura è quella adesiva perché, mentre le altre si possono praticamente eliminare, l'usura adesiva è sempre presente. Basta pensare che essa si verifica anche senza strisciamento, per semplice contatto. Anche premendo una asta di rame con punta arrotondata contro una superficie di acciaio con una forza di appena 0.9 kg, traccianti radioattivi hanno mostrato un trasferimento di materiale di 10 μg di rame nell'acciaio e di 10 μg di acciaio nel rame. Interponendo un lubrificante l'effetto si è ridotto di 100 volte, ma non eliminato.

L'usura, benché in genere da combattere quale agente distruttivo, torna talvolta utile, come quando la si ricerca artificialmente .

Il funzionamento di mole, carta smeriglio, etc. è basato sull'usura di tipo abrasivo; lo stesso dicasi per le rettifiche.

L'autoaffilatura delle frese di certi rasoi elettrici è affidata all'usura sulla loro gabbia-guida. Le seghe ad acido, quelle per il taglio dei cristalli, funzionano per usura. Si scrive a matita, a pastello, a gesso e si cancella con la gomma grazie all'usura (prevalentemente adesiva).

L'usura, infine, può essere un indice nella ricostruzione di eventi tecnici. Dall'usura delle scarpe si può risalire ai difetti della gamba, dall'usura dei pneumatici ai difetti di convergenza delle ruote di una vettura, dall'usura di una canna di un motore ai difetti di montaggio delle segmentature, etc...

1.1.2.2 Il meccanismo dell'usura

Presso il M.I.T. (U.S.A.) sono stati recentemente condotti studi per appurare i particolari del meccanismo dell'usura.

Si è osservato che il numero delle microsaldature (o giunzioni) che costituiscono la remora al moto relativo è elevatissimo e dipende essenzialmente dalla natura dei corpi e dallo stato delle superfici a contatto.

Corrispondentemente risulta relativamente molto ridotto il numero delle particelle libere che si formano per effetto dei distacchi.

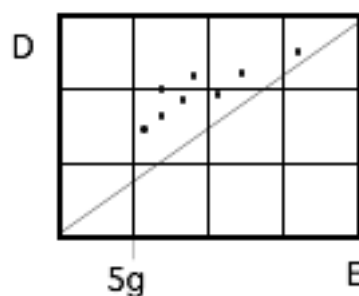
Esiste una correlazione tra la natura del materiale ed il numero e le dimensioni delle particelle che si liberano dal distacco : in particolare la dimensione e il numero delle particelle è in relazione alla quantità di energia specifica elastica che il materiale può assorbire prima di giungere allo snervamento.

Concettualmente la cosa si spiega pensando che per frantumare un corpo occorre dell'**energia** per il distacco delle parti: energia proporzionale all'estensione delle nuove superfici formate. Poiché per un certo volume di solido l'energia disponibile è soltanto quella elastica acquisita fino allo snervamento, ne deriva che tale limite si traduce in un limite alle nuove superfici generate e quindi alle dimensioni dei frammenti. Poiché l'energia per lo snervamento è un limite superiore di energia disponibile, corrispondente limite delle dimensioni delle particelle è un limite inferiore (più piccole sono le particelle, più grande è il rapporto superficie/massa).

Gli esperimenti del M.I.T. hanno convalidato la teoria mostrando dimensioni dei frammenti sempre maggiori di quelli minimi calcolati.

Si è anche sperimentalmente dimostrato che può esistere un valore del carico sul contatto, al disotto del quale, non si raggiunge sulle asperità a contatto il limite della energia specifica elastica prima dello snervamento e quindi non si producono frammenti liberi di usura.

Ciò è illustrato da un esperimento fatto con oro (che non crea ossidi e quindi effetti secondari indesiderati). Si è detto che la dimensione dei frammenti liberi è caratteristica del materiale: per l'oro è di $12 \mu m$. Essendo definita la dimensione, il calcolo dell'energia conduce al numero delle particelle. La situazione sperimentale era tale che fino al limite elastico (nella fattispecie raggiungibile con 5 g di carico) non si potesse ottenere l'energia necessaria per liberare una sola particella. *Dal diagramma emerge che di fatto si è ottenuta liberazione di frammenti solo quando si sono superati i 5 g di carico.*



La cosa va vista naturalmente in senso statistico, tanto che in pratica la formazione di frammenti liberi può essere drasticamente ridotta ma non eliminata, ma quanto precede mostra comunque che l'usura è funzione anche del carico sull'accoppiamento dei corpi a contatto.

La rugosità della superficie (Δh tra picco e valle) non varia durante il processo di usura perché pari al diametro medio dei frammenti che via via si distaccano, dimensione che - come si è detto - dipende dalla natura del materiale.

Di ciò va tenuto conto nel progetto, perché questo concetto governa la tolleranza da assegnare tra superfici striscianti.

In questo genere di calcoli occorre prevedere che la dimensione media delle particelle è dell'ordine di 10 volte quella minima calcolabile col criterio dell'energia (le incertezze stanno nella valutazione del volume interessato all'accumulazione di energia) e la dimensione massima è dell'ordine di circa 50 volte quella minima.

Le osservazioni sperimentali e la predetta interpretazione dei fenomeni può aprire la strada ad una importante riduzione degli effetti indesiderati dell'usura.

1.1.3 La valutazione quantitativa dell'usura

Tecnicamente la valutazione dell'usura viene fatta mediante la semplice formula di BURWELL e STRANG, proposta anche da ARCHARD:

$$V(t) = K A l(t)$$

ove V è il volume di metallo asportato per usura, durante uno strisciamento di lunghezza l quando A è la reale area di contatto tra i due corpi che strisciano. K è un coefficiente adimensionale detto coefficiente di usura.

Sia ben chiaro che A non è l'apparente area geometrica di contatto, giacché anche superfici molto lisce appoggiano in realtà su pochi punti o meglio, su ristrette areole pressoché puntiformi. Un concetto più realistico di A si può avere pensandola la somma delle sezioni delle "giunzioni" o "microsaldature" tra i corpi. Quindi A è enormemente più piccola dell'apparente area di contatto e nemmeno ad essa legata da proporzionalità, tanto che si può asserire che l'usura è indipendente dall'area geometrica di contatto e questa si può assumere (Archard) come **1° legge dell'usura, parallela alla 1° legge dell'attrito (Amonton)**.

La reale area di contatto A rifugge da una misura geometrica e sperimentalmente la si determina con metodi ottici (interferometrici) o elettrici (conduttometrici).

Nella formula di Archard può sembrare anzi strano che non compaia il carico Q tra i corpi striscianti, ma in realtà esso è presente poiché, posta p uguale alla pressione misurata sulle asperità del materiale più "tenere" in condizione prossime allo snervamento, e quindi

plafonata da un valore massimo che dipende dalla natura del materiale, a misura che cresce Q aumenta A, di modo che A può anche esprimersi come :

$$A = \frac{Q}{p}$$

conseguentemente:

$$V(t) = K \cdot \frac{Q \cdot l(t)}{p}$$

Il valore di p dipende dunque dal minore dei due valori di energia che ciascuno dei due materiali a contatto è in grado di accumulare sulle asperità, prima di verificarne lo snervamento .

In sede di approfondimento sperimentale, è stata inoltre osservata una dipendenza del valore di p dal tipo di moto relativo tra i due corpi a contatto: detta p₀ la pressione p in caso di moto relativo nullo e p_s (di slittamento) la p per moto relativo diverso da zero, si ha :

$$p_s^2 + \beta \cdot s^2 = p_0^2$$

dove s è il rapporto tra la forza tangenziale T sul contatto e la superficie A che, come si è visto, può porsi A=Q/Ps; ne deriva :

$$s = \frac{T}{A} = \frac{f \cdot Q}{A} = f \cdot p_s \quad f = \text{coeff. attrito}$$

mentre β è un coefficiente numerico che nel caso di moto bidimensionale vale 3 .

In definitiva la dipendenza della pressione dal tipo di moto si scrive:

$$p_s = \frac{p_0}{\sqrt{1 + 3 \cdot f^2}}$$

Prescindendo dallo stato delle superfici a contatto il coefficiente di usura K tiene conto della natura dei materiali a contatto e delle loro caratteristiche fisiche e chimiche (durezza, raggio atomico, ecc.).

Riferendosi ad accoppiamenti tra superfici pulite ed asciutte, in assenza di lubrificante e sotto vuoto spinto, il K non è altro che la probabilità che si formi una particella di usura da una giunzione; così che dire K = 10⁻³ significa che si forma un frammento ogni 1000 giunzioni, come detto a suo tempo.

Difatti, se v è il volume medio dei frammenti di usura ed N(t) il loro numero, è: V(t) = N(t) v, e se a è l'area di una giunzione media ed N₀ il numero di queste: A = N₀ * a.

La formula di Archard diventa così:

$$N(t) \cdot v = K \cdot N_0 \cdot a \cdot l(t) \quad ; \quad \frac{N(t)}{N_0} = K \cdot \frac{a \cdot l(t)}{v}$$

Supponiamo che le giunzioni costituiscano colonnine cilindriche di raggio r e che i frammenti siano alti $h=2r$ per eguaglianza delle tre dimensioni (supporre forme diverse non limita la generalità del discorso).

Allora:

$$a = \pi \cdot r^2 \quad ; \quad v = \pi \cdot r^2 \cdot 2r = 2\pi r^3$$

mentre la lunghezza di scorrimento che taglia le N_0 giunzioni è $2r$, poiché con uno scorrimento più lungo altre se ne formerebbero. Quindi:

$$p = \text{stima di probabilità} = \frac{N}{N_0} = K \frac{\pi r^2 \cdot 2r}{2\pi r^3} = K$$

La validità della formula di Archard, limitata dal fatto che essa non tiene conto dello stato delle superfici a contatto o della presenza di sostanze estranee tra le superfici (ad esempio lubrificanti), diventa più efficace con una modifica introdotta recentemente dal Rowe (Mobil Spa).

Egli considera che un lubrificante o una sostanza qualunque interposta assolve in realtà la funzione di separare le superfici, riducendo (in regime di lubrificazione fluida perfetta addirittura a zero) la reale area di contatto ad un valore $A_0 < A$, che rappresenta l'effettiva area di contatto metallo/metallo. Si può così scrivere la formula di Archard con A_0 :

$$V(t) = K \cdot A_0 \cdot l(t)$$

Chiamando α il rapporto A_0/A , che dipende dalla efficienza della lubrificazione e dal tipo di lubrificante, la precedente diventa

$$V(t) = K \cdot \alpha \cdot A \cdot l(t) = K \cdot \alpha \cdot \frac{Q}{p} \cdot l(t)$$

Questa equazione contiene 2 parametri: K e α , il primo dipendente dalla natura dei metalli secchi e il secondo dalle sostanze interposte.

Al riguardo Rowe ha recentemente proposto un criterio di valutazione, suffragato da esperimenti, basato sul calore di assorbimento del lubrificante alla parete, che è legato alla tenacità del film lubrificante. Ed è chiaro che più è tenace il film più piccolo è α , cioè più ridotto il contatto metallo/metallo. Il criterio del Rowe, sviluppato da Kingsbury, porta alla seguente espressione

$$\alpha = 1 - e^{-\frac{t}{t_1}}$$

ove: t_x è il tempo che impiega una asperità a percorrere uno spazio pari al diametro della molecola di lubrificante adsorbita; se X è tale diametro (o meglio quello dell'areola connessa con l'adsorbimento) e u la velocità di scorrimento: $t_x = X/u$; mentre t_r è il tempo di permanenza di una molecola adsorbita nello stesso posto.

Secondo Boer:

$$t_r = t_0 \cdot e^{\frac{E}{RT_s}} \quad R = \text{cost. universale}$$

ove t_0 è il "tempo fondamentale di vibrazione" della molecola nello stato adsorbito, E l'energia (calore) di adsorbimento e T_s la temperatura assoluta del film lubrificante in corrispondenza della parete.

Mentre E è una caratteristica intrinseca del lubrificante (ad es. 11.7 kcal/mole per il n-esadecano, idrocarburo rappresentativo di un medio lubrificante), delicato è il calcolo del tempo fondamentale t_0 , dell'ordine di 10^{-13} s.

Per esso vale la formula chimico-fisica:

$$t_0 = 4,75 \cdot 10^{-13} \cdot \sqrt{\frac{M \cdot V_m^2}{T_m}}$$

ove M è la massa molecolare, V_m il volume molare e T_m il punto di fusione.

Sostituendo le ultime formule in quella di α si ottiene

$$\alpha = 1 - e^{-\frac{X}{u \cdot t_0} \cdot e^{\frac{E}{RT_s}}}$$

ma introdurre questa espressione di α in quella del volume di usura comporta serie complicazioni di calcolo.

Poiché fortunatamente α assume valori piccolissimi (0.01 o meno), un'ottima approssimazione si ottiene approssimando $\ln(1 - \alpha)$ con $-\alpha$ (beninteso la semplificazione non vale per bassissime velocità di avanzamento (0.001 cm/s o meno), o per T_s estremamente alte, giacché risulterebbero valori di $\alpha > 1$, non verosimili!). In tal modo:

$$\alpha = \frac{X}{u \cdot t_0} \cdot e^{\frac{E}{RT_s}}$$

e la formula del volume di usura:

$$V(t) = K \cdot \frac{X}{u \cdot t_0} \cdot e^{\frac{E}{RT_s}} \cdot \frac{Q}{p} \cdot l(t)$$

calcolabile con le considerazioni fatte ed in base ai valori delle grandezze chimico fisiche che vi figurano, che studi in corso (sui quali sarebbe troppo lungo soffermarsi) cercano di determinare numericamente con sempre maggiore approssimazione.

Esperienze già condotte dimostrano la validità dell'indirizzo seguito.

La relazione tra il volume asportato per usura ed il tempo di funzionamento, è immediatamente determinabile allorché sia nota la legge del moto relativo (cinematismo) realizzato nell'accoppiamento in esame.

1.2 Criteri per ridurre l'usura

E' utile ricordare i seguenti criteri per ridurre l'usura:

a - scelta opportuna dei metalli a contatto

Occorre scegliere accuratamente i metalli a contatto, facendo attenzione che le particelle di usura abbiano dimensioni (dipendenti appunto dalla natura dei metalli) inferiori ai giochi e che - salva la resistenza meccanica - sia basso il lavoro elastico accumulabile nelle asperità entro i limiti di snervamento.

I due metalli devono essere il meno possibile miscibili.

I loro raggi atomici devono differire di oltre il 7%. per diminuire il numero di microsaldature. Ad esempio il ferro ($r= 1.27 \text{ \AA}$) è microsaldabile con i soliti metalli, mentre non lo è con il piombo ($r= 1.74 \text{ \AA}$). Il Pb a sua volta, è microsaldabile con An, Pt, Zn, Bi. Due placchette di Indio e Argento raschiate e sfregate danno luogo a microsaldature che resistono ad un'azione tangenziale di ben 100 g/mm^2 , a causa dei raggi atomici quasi uguali.

b - predisposizione all'atmosfera

L'atmosfera in cui si sviluppa l'usura è importantissima. Lo strato d'ossido che circonda le superfici metalliche spesso è provvidenziale, tanto che senza di esso l'attrito sarebbe ben maggiore.

La forte microsaldabilità tra An, Pb, Pt, Zn, Bi, prima ricordata è in gran parte dovuta alla scarsa ossidabilità di tali metalli.

Goccioline di Hg in atmosfera di $\text{H}_2 \text{ S}$ difficilmente si saldano perché lo strato superficiale solforoso che si forma funge da antisaldante.

c - lubrificazione

Gli effetti benefici della lubrificazione si ripercuotono sul valore $\alpha= A_0/A$ come già illustrato.

d - trattamento delle superfici

La pratica di trattare le superfici è intuitiva, ma la sua corretta applicazione non consiste nell'indurire le superfici, bensì nel renderle "meno metalliche" ossia nel metalloidizzarle.

Tracciando sulla tabella periodica la congiungente il Boro B (IIIA-5) con il Bismuto Bi (VA-83), gli elementi a sinistra hanno carattere prevalentemente metallico (pochi elettroni di valenza) e quelli a destra carattere metalloidico (molti elettroni di valenza). Inoltre in generale ogni elemento che si trova alla destra di un altro ha più elettroni di valenza ed è quindi più "metalloidico" rispetto a quest'ultimo.

Metalloidizzare le superfici corrisponde dunque a proteggerle con materiali i cui elementi costituenti abbiano carattere prevalentemente metalloidico.

Per la metalloidizzazione dei metalli si possono fare apporti di massa o diffusioni in superficie.

Apporti di massa sono le additivazioni di metalli spostati verso destra nella tabella di Mendeleiev: Al, Sb, Si, Pb, etc. Si noti ad esempio che tutte le leghe antifrizione sono per antica esperienza a base di piombo e antimonio.

La diffusione in superficie consiste nella diffusione di un metalloide sulla superficie del metallo: C, N, P, O, S, Cl. I procedimenti più classici sono la carburazione (diffusione di C), la fosfatazione (diffusione di P), la sulfunizzazione (diffusione di S). Non meno nota è l'ossidazione controllata (diffusione di O) (si è già detta l'utilità degli strati d'ossido ai fini dell'usura). Questi processi sono vantaggiosi non tanto per l'indurimento superficiale che essi provocano, quanto appunto per la metalloidizzazione delle superfici. Lo stesso dicasi per la nitrurazione che, vantaggiosa col tradizionale processo Krupp (della durata di 80 : 100 h) ancor più lo è con i moderni processi accelerati (ionici, della durata di 0.5 : 8 h) specialmente su acciai al Cr. (N.B. mentre la nitrurazione conferisce scorrevolezza e proprietà antiusura agli acciai duri, la sulfunizzazione la conferisce prevalentemente a quelli teneri).

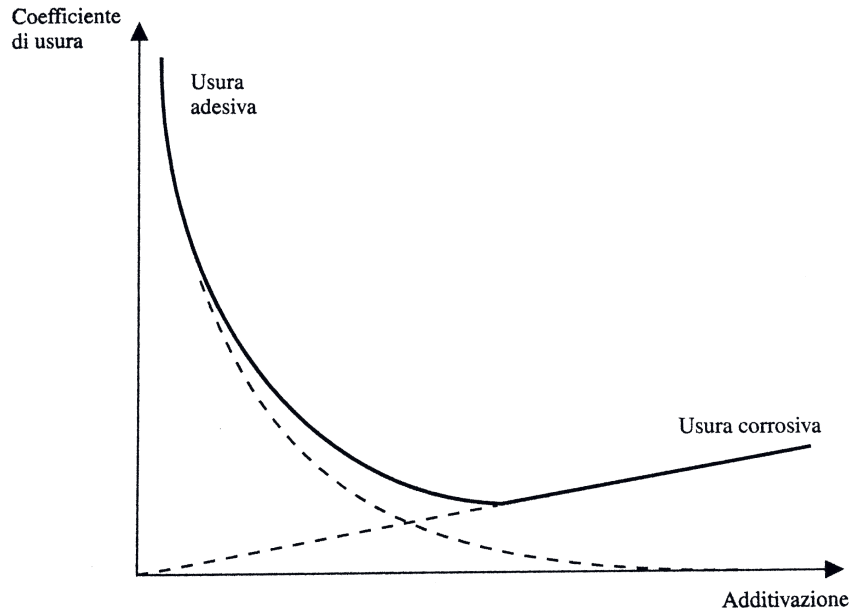
Particolare menzione merita la diffusione superficiale di Pb - MoS₂.

Il valore del raggio atomico del Pb spiega le sue proprietà antiusura. Inoltre esso ha un modesto carico di rottura ($\sigma_R = 1.45 \text{ Kp/mm}^2$) e quindi di snervamento (variabile con la temperatura secondo la relazione di Schreiner: $\sigma_R = 1.45 \cdot 10^{-5} (327 - t)^2$), assenza di fragilità, bagnabilità da parte dei lubrificanti, attitudine a rivestire superfici.

Il Pb non è però "scorrevole" ed occorre perciò lubrificarlo; ben si presta, come lubrificante solido il MoS₂ che però è costoso e, se applicato in polvere o incorporato in grasso si disperde facilmente.

Il processo Renon consente di fissarlo superficialmente come dispersione solida, realizzando un ottimo materiale antiusura.

Con questo ed altri metodi di additivazione delle superfici occorre però fare attenzione che non insorga usura corrosiva (di natura chimica) poiché, all'aumentare degli agenti metalloidici il rapporto tra usura adesiva e corrosiva varia come nel seguente diagramma. Né è facile per il momento identificare con esattezza le condizioni di compromesso più vantaggiose, salvo che con lunga esperienza.



Tra i trattamenti superficiali, ai fini dell'usura vanno in ultimo ricordate le disposizioni elettrolitiche di Sn, Ag, Cu, Co, Cd (cadmiatura), Ni, Zn, Pb, tutti a destra del Fe (cioè più a carattere metalloidico) nella tabella periodica. Anche questi trattamenti forniscono buoni risultati.

Material ⁹	Purity	Affinity for water	Coefficient of friction		Wear area (sq in.)	Observed effect of solid on specimens
			1-min sliding	30-min sliding		
<i>Effective lubricants</i>						
MoS ₂	Possibly slight oxide present	Insoluble	0.017	0.047	0.0016	None
CdI ₂	Chemically pure	Soluble	0.04	0.06	0.0023	None
CdCl ₂	Chemically pure	Soluble	0.03	0.07	0.0019	None
WS ₂	Unknown	Insoluble	0.05	0.08	0.0018	None
Ag ₂ SO ₄	Chemically pure	Slightly soluble	0.14	0.14	Nil	None
PbI ₂	Chemically pure	Slightly soluble	0.28	0.28	0.0018	None
Graphite	Purified commercial lubricant small particle size	Absorbs water	0.06	0.11	0.0034	None
Zn(C ₁₈ H ₃₅ O ₂) ₂	Chemically pure	Insoluble	0.07	0.11	0.0032	None
CoCl ₂	Prepared by dehydration	Soluble	0.04	0.10	0.0020	Slight rusting
HgI ₂	Chemically pure	Very slightly soluble	0.18	0.18	0.0021	Appreciable corrosion
CuBr ₂	—	Deliquescent	0.04	0.06	0.0021	Considerable rusting
AgI	Chemically pure	Insoluble	0.19	0.25	0.0033	None
SAE 60	—	—	0.13	0.108	0.0020	—

