

# Montaggio, accensione e... via!

GABRIELE LAUGISCH  
ALESSANDRO MASSOLA

Non è così semplice, ma la lubrificazione a grasso offre notevoli vantaggi rispetto ai sistemi aria-olio. È affidabile dal punto di vista dell'esercizio fino a velocità elevata ed è più economica rispetto ad altri metodi di lubrificazione, non richiedendo manutenzione né unità esterne per l'adduzione

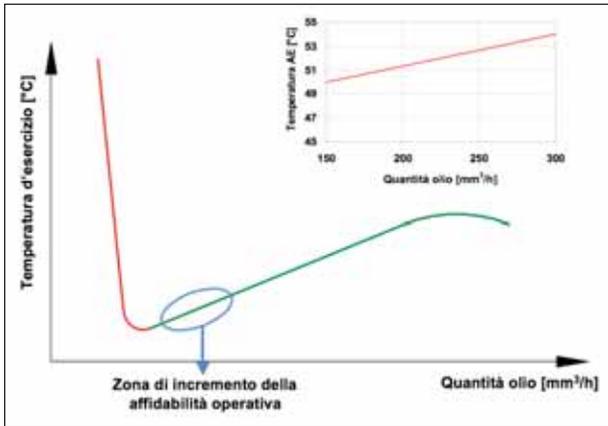


Esaminiamo, i costi d'esercizio. Un cuscinetto con diametro medio di 90 mm, sfere in ceramica e velocità 10.000 giri/min, per garantire una durata teorica di esercizio del grasso di 17.300 ore, con probabilità di cedimento del 10%, richiede 7.1 cm<sup>3</sup> di grasso, oppure 26.000 m<sup>3</sup> di aria e 3.460 cm<sup>3</sup> di olio che deve essere smaltito. Teniamo conto poi che, per garantire l'affidabilità in esercizio con l'aria-olio, si consiglia l'adduzione di una quantità di olio maggiore di quella di funzionamento alla minima temperatura di esercizio.

Ciò per evitare che una riduzione nell'adduzione di olio causi attrito misto e, alla peggio, attrito da particelle solide, foriero di cedimento del mandrino. Un altro vantaggio della lubrificazione a grasso è la pulizia. L'elaborato filtraggio associato ai sistemi aria-olio non è richiesto e, usando cuscinetti schermati, non vi è potenziale contaminazione del lubrificante o del cuscinetto né al montaggio né in esercizio. La stabilizzazione data al film lubrificante dall'addensante, apprezzabile nel campo dell'attrito misto a bassa velocità,

è un ulteriore benefit della lubrificazione a grasso.

I sistemi aria-olio godono invece di una maggiore idoneità alla velocità e di una durata di esercizio illimitata. Oggi la lubrificazione a grasso è applicabile fino a parametri di velocità  $n \times dm$  (diametro medio del cuscinetto  $\times$  velocità) di  $1,6 \times 10^6$  mm  $\times$  rpm con durate d'esercizio accettabili. L'obiettivo è di incrementare la velocità a pari durata, oppure aumentare quest'ultima mantenendo i parametri di velocità raggiungibili.



Curva di Stribeck, temperatura di funzionamento in funzione della quantità di olio

Usura abrasiva	Usura adesiva
<b>Causa:</b> Contaminanti contenenti particelle estranee <b>Effetto:</b> Alterazione rugosità superficiale, asportazione di materiale, variazioni geometria, cedimento del lubrificante	<b>Causa:</b> Mancanza di film lubrificante (lubrificante non idoneo, aumento temperatura...) <b>Effetto:</b> Deposito materiale, maggiormente sui corpi volventi, con successiva riscalatura

Comportamento all'usura.

### Il film lubrificante

Circa il 90% dei cuscinetti per mandrini installati funziona entro il campo di resistenza a fatica, senza cioè superare le pressioni ammissibili di contatto. Un numero esiguo di cuscinetti cede, quindi, per fatica del materiale. La principale causa di cedimento è l'usura, da distinguersi tra abrasiva e adesiva. L'usura abrasiva si verifica quando particelle solide entrano nel meato lubrificante, causando lo sfaldamento del materiale delle piste di rotolamento e dei corpi volventi. È indotta, più frequentemente, con lubrificazione a olio, da un filtraggio carente oppure se i tubi di adduzione non sono puliti. Altre cause sono da ricercare in tenute del mandrino inadeguate o inquinamento dei cuscinetti al montaggio. L'usura si definisce adesiva quando il film lubrificante si rompe, mettendo le piste di rotolamento a contatto diretto con i corpi volventi. Il contatto rompe le creste del materiale e produce particelle che vengono poi riscaldate, causando intaccature nelle piste e il loro rapido deterioramento. La rottura del meato può essere dovuta al lubrificante esausto oppure inadatto o a temperature eccessive. Un film lubrificante idoneo tra sfera e pista previene l'usura e permette di ottenere una buona affidabilità in esercizio. Consideriamo il film lubrificante minimo  $h_{min}$  sul lato di uscita (exit side), calcolato con la formula di Hamrock e Dowson per il contatto puntiforme:

$$h_{min} = 3,63 * U^{0,68} * G^{0,49} * W^{-0,073} * (1 - e^{-0,68*k}) * R_r$$

dove

- U è il parametro di velocità,

- G è il parametro del materiale,
- W è il parametro di carico
- R<sub>r</sub> è il raggio di curvatura ridotto, ovvero le condizioni di curvatura tra i corpi volventi e le piste di rotolamento. I materiali, la velocità, la geometria ed il carico del cuscinetto, oltre al lubrificante e alla temperatura d'esercizio, condizionano lo spessore minimo del film lubrificante.

### Spessore minimo del lubrificante

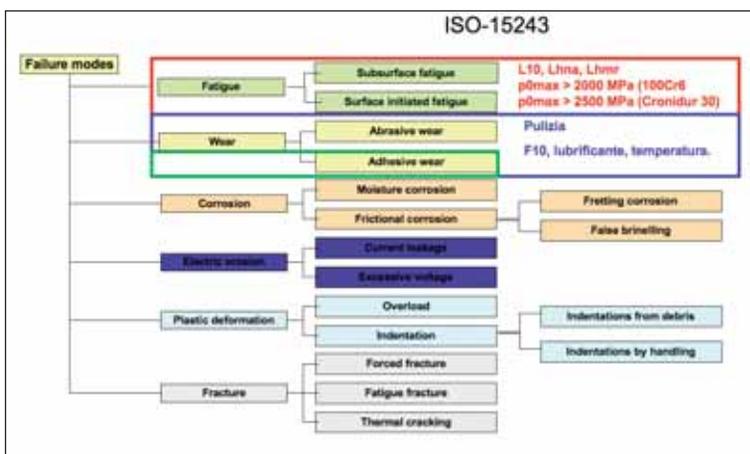
Il lubrificante ha l'effetto maggiore sullo spessore del meato. La viscosità dinamica  $\eta_0$  è inclusa nel parametro di velocità U, secondo la relazione

$$U = \eta_0 * \frac{v}{E' * R_r}$$

ed è il prodotto della densità del lubrificante  $\rho$  e della viscosità d'esercizio  $\nu$ .

$$\eta_0 = \rho * \nu$$

La viscosità d'esercizio è funzione del rapporto viscosità/temperatura ( $\nu/T$ ) del lubrificante e della temperatura d'esercizio. La scelta del lubrificante, pertanto, influenza la densità e il comportamento  $\nu/T$  dello spessore del film lubrificante. Il tradizionale diagramma  $\nu/T$  è riferito agli oli e agli oli base dei grassi, i grassi moderni mostrano un comportamento migliore. La viscosità d'esercizio diminuisce all'aumentare della temperatura di funzionamento, causando una drastica riduzione dell'altezza minima del film lubrificante. È quindi necessario minimizzare la temperatura d'esercizio



Analisi dei danneggiamenti.

oppure scegliere un lubrificante con una viscosità adeguata alla massima temperatura d'esercizio, per ottimizzare il film lubrificante. I grassi hanno un vantaggio decisivo, rispetto agli oli, grazie al contributo dell'addensante nella formazione del meato, come confermato dalla sperimentazione. Sono stati testati, a diverse temperature, due grassi con lo stesso olio base ma diversi addensanti, e il loro olio base separato. Inizialmente lo spessore del film dell'olio base segue l'andamento teorico, mentre i grassi si avvantaggiano sulla teoria. Questo divario si esalta al crescere della temperatura e, quindi, quando la viscosità d'esercizio diminuisce.

Quando il film lubrificante con olio base puro si rompe, lo spessore del film dei grassi, al contrario, continua ad aumentare, con minime differenze dovute agli addensanti. Un'altra proprietà del lubrificante, influente sullo spessore del film, è il coefficiente  $\alpha$  di pressione/viscosità, incluso nel parametro G

$$G = \alpha * E'$$

$\alpha$  dipende dall'olio base e dalla viscosità cinematica e, per i grassi in particolare, deve spesso essere sperimentalmente determinato.

L'aumento di  $\alpha$ , determinato dalla scelta del grasso, comporta l'incremento dell'altezza del film lubrificante. Analizziamo ora l'effetto della velocità sull'altezza del film lubrificante. A bassa velocità il meato ha un'altezza contenuta, con rischio di attrito misto. Nella pratica, un gran numero di mandrini è soggetto a uno spettro di carico che prevede lavorazioni a velocità elevate, ma è anche utilizzato con sforzi elevati a bassa ve-

locità. Anche in queste condizioni, di teorico attrito misto, con lubrificazione a grasso la durata del cuscinetto non è così bassa, ad ulteriore conferma del contributo dell'addensante.

L'aumento di velocità è positivo per l'altezza del film lubrificante, ma crea tensione sul lubrificante e sull'intero sistema e induce un aumento della temperatura, con l'effetto di ridurre la viscosità e quindi l'altezza del film lubrificante.

Vi sono inoltre limiti fisici per l'adduzione di un'idonea quantità di olio base nella zona del contatto volvente. La velocità influenza direttamente an-

$$v = \frac{\pi}{2} [(n_{JR} - n_O) * d_{JR} + n_W * d_W]$$

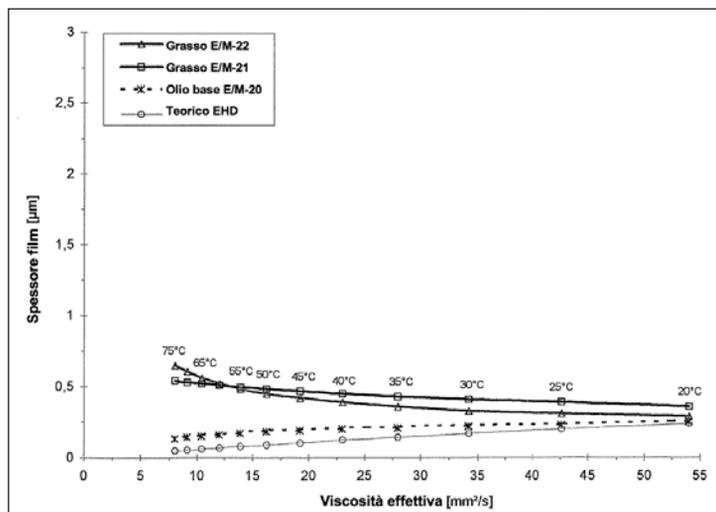
(per anello interno rotante)

che considera la velocità nel contatto volvente come funzione della velocità dell'anello rotante  $n_{JR}$ , dei corpi volventi in rivoluzione  $n_O$  e in rotazione  $n_W$  intorno al loro proprio asse, e i diametri della pista di rotolamento dell'anello rotante  $d_{JR}$  e dei corpi volventi  $d_W$ . Esaminiamo ora la velocità idrodinamica effettiva di due cuscinetti di uguali dimensioni, alla stessa velocità ma con sfere di diverso diametro. La velocità del contatto volvente per il cuscinetto B standard è inferiore a quella

del cuscinetto HS con sfere piccole: è quindi più semplice far confluire l'olio base nella zona del contatto volvente del cuscinetto con sfere più grandi e la deformazione sul lubrificante causata dalla laminazione delle particelle è ridotta. Altri aspetti della sollecitazione, risultanti da più ampie ellissi di contatto e dal maggior peso delle sfere, richiedono una trattazione dedicata. L'influenza della geometria del cuscinetto sulla durata in esercizio è quindi

confermata. La lubrificazione aria/olio per velocità elevate agevola questa situazione, garantendo regolare adduzione di olio, ma associa i costi e gli svantaggi per l'ambiente. Per incrementare le prestazioni, l'ottimizzazione della geometria dei cuscinetti offre possibilità di sviluppo, ma le maggiori potenzialità risiedono in grassi per alta velocità, che garantiscano la corretta adduzione di olio.

**Incremento della durata del grasso**  
Riassumiamo qui alcuni metodi per



Fattori che influenzano l'altezza minima del film lubrificante (comparazione tra lo spessore del film lubrificante di grassi con lo stesso olio base ISO VG22 e variazione della tipologia di addensamento come funzione dell'attuale viscosità).

che la durata di esercizio del grasso. Fino a parametri  $n \times dm$ , di circa  $1,6 \times 10^6 \text{ mm} \times \text{rpm}$ , è sufficiente considerare la velocità connessa con la sollecitazione del lubrificante e con l'adduzione dell'olio base nella zona del contatto volvente, purché il grasso, il cuscinetto e le condizioni operative siano opportunamente valutate. Nelle zone limite della lubrificazione a grasso ( $1,6 \dots 2,0 \times 10^6 \text{ mm} \times \text{rpm}$ ) deve essere effettuato un esame più preciso, sfruttando la velocità v idrodinamica effettiva

incrementare la durata del grasso.

### 1. Materiali di alta qualità.

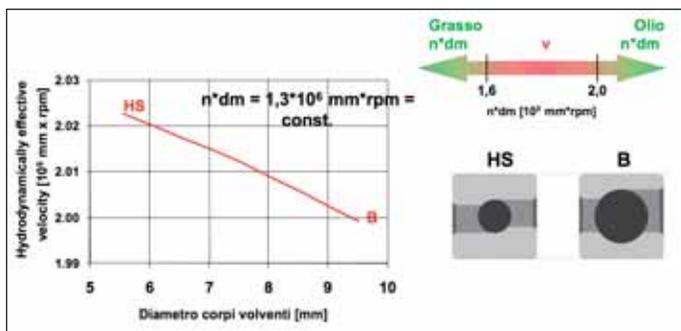
Il cuscinetto ibrido, rispetto al cuscinetto con sfere in acciaio, può triplicare la durata del grasso. Il minor peso delle sfere ceramiche riduce la forza centrifuga, quindi l'attrito, la temperatura di funzionamento e la sollecitazione sul lubrificante. In più, le differenze di temperatura, spesso elevate, che si registrano tra l'albero e l'alloggiamento e, quindi, tra gli anelli del cuscinetto, quando l'albero è più caldo, riducono il culmine del gioco radiale interno per la diversa espansione degli anelli, facendo variare l'angolo di contatto negativamente per il funzionamento, con aumento dell'attrito, della temperatura e dello stress sul lubrificante. Il minor coefficiente di espansione termica del materiale ceramico ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) rispetto all'acciaio mitiga questo effetto.

L'acciaio Cronidur 30 a tempra di azoto, privo di carburi, ha una composizione strutturale più fine, e garantisce maggiore durezza, migliore resistenza e superiori limiti di fatica rispetto al 100Cr6. Queste proprietà, unitamente alle sfere ceramiche, riducono l'attrito e quindi la temperatura nella zona del contatto, migliorando la durata d'esercizio.

### 2. Riserva di grasso

Una riserva di grasso eroga olio per un tempo più lungo, ma è efficace fino a una larghezza pari alla metà del diametro della sfera o dello spessore del cuscinetto, oltre questo limite non vi è scambio di olio base con la zona del contatto. Poiché il grasso in eccesso non può fuoriuscire, un cuscinetto con riserva di grasso deve essere trattato come se fosse schermato: la quantità di primo ingrossaggio (riserva esclusa) è inferiore a quella per i cuscinetti aperti, altrimenti non si stabilizzerà la temperatura durante il rodaggio (steady-state) e l'attrito di lubrificazione indurrà un surriscaldamento (hot running) e quindi

## 9. Velocità idrodinamica effettiva.



il cedimento del cuscinetto. Per mandrini usati in verticale, la riserva di grasso deve essere collocata sopra i cuscinetti.

Il volume supplementare per la riserva e l'incerto incremento della durata di esercizio sono gli svantaggi di questa soluzione.

### 3. Rilubrificazione

Richiede spese aggiuntive rispetto alla lubrificazione a vita e spazio per il grasso esausto, e il maggiore attrito per adduzione eccessiva può danneggiare il cuscinetto. L'adduzione assiale del grasso non è raccomandata: il cuscinetto potrebbe risucchiare il grasso esausto inquinato, ed è quasi impossibile misurare esattamente il quantitativo iniettato, poiché non è certo che tutto il grasso arrivi al cuscinetto. La soluzione ideale è l'adduzione radiale del grasso attraverso fori nell'anello esterno di diametro tale da minimizzare gli effetti di trafilamento (shearing) del grasso. I grassi usuali come gli Arcanol L075 e L252, sono meno idonei: se sono costretti a trafilare o mantenuti a lungo sotto pressione, l'olio base si separa dall'addensante riducendo l'effetto lubrificante. È stato quindi sviluppato il grasso LC252, ma ancora in fase di sperimentazione. Per l'adduzione del grasso vi sono vari sistemi, ma pochi sono applicabili sui mandrini, per l'elevata velocità e le quantità molto piccole e misurabili. Sono stati provati due dispositivi con motore passo-passo: uno per l'adduzione a un singolo punto con dispositivo di rilascio del grasso e uno per l'adduzione si-

multanea a quattro punti senza dispositivo di rilascio. I test sono stati eseguiti con grassi L075, L252 ed LC252, su cuscinetti 7006 sia con sfere HS di piccole dimensioni, sia con sfere B standard, a velocità maggiori di quelle di catalogo per lubrificazione a grasso, iniettando quantità di grasso superiori al consigliato, per dimostrare la validità del sistema.

Le temperature rilevate durante e dopo l'ingrossaggio, non denotano significative differenze al variare del dispositivo o del grasso. Le temperature del cuscinetto con sfere piccole sono risultate superiori a quelle del cuscinetto con sfere grandi, che è quindi, risultato più idoneo, almeno per il test.

## Conclusioni

La lubrificazione a grasso è semplice, affidabile ed economica, idonea ad alta velocità, e potenzialmente sviluppabile. Per utilizzarla con successo, è necessario esaminare la composizione del grasso, la geometria del cuscinetto e le condizioni di esercizio ed al contorno, per scegliere il prodotto idoneo.

## Simboli utilizzati

$k$  rapporto tra i semiassi delle superfici di contatto.

$E'$  modulo di elasticità.

G. Laugisch, Application Engineer Spindle Bearings, Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG.

A. Massola, Business Development Manager, Spindle Bearings & Mechatronics, Schaeffler Italia Srl.