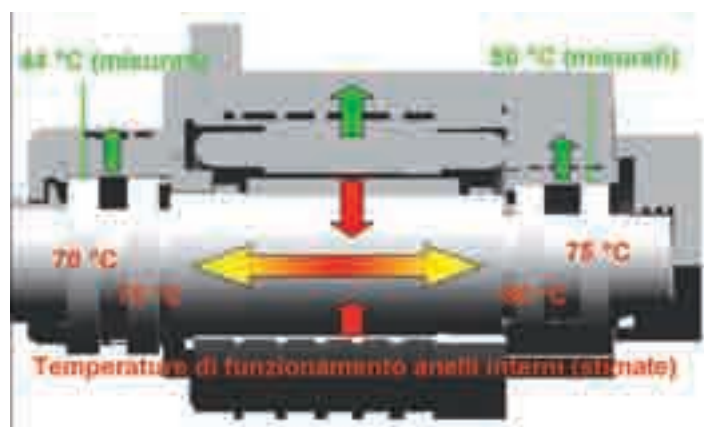


Mandrini **resistenti** alla temperatura



1. Mandrino HPC
per lavorazione stampi.

Negli ultimi due anni sono intervenuti significativi aumenti di produttività in un'ampia gamma di lavorazioni meccaniche, spinti da nuove applicazioni, materiali e prodotti. In tale contesto, la tecnologia del "High Performance Cutting" (HPC) ha consentito riduzioni significative dei tempi di lavorazione, conducendo i progettisti delle macchine utensili verso nuove sfide.

Le moderne macchine utensili e i componenti devono essere:

- robuste, per lavorare a elevata cadenza produttiva,
- flessibili, per lavorare elementi in un unico piazzamento con differenti tecnologie, processi e parametri (ad es. sgrossatura e finitura di uno stampo in un unico piazzamento).

Analizzando il mandrino per macchina utensile, tali sviluppi possono generare requisiti differenti e tra loro in conflitto. Ai nuovi mandrini si richiede, ad esempio, elevata rigidità e ca-

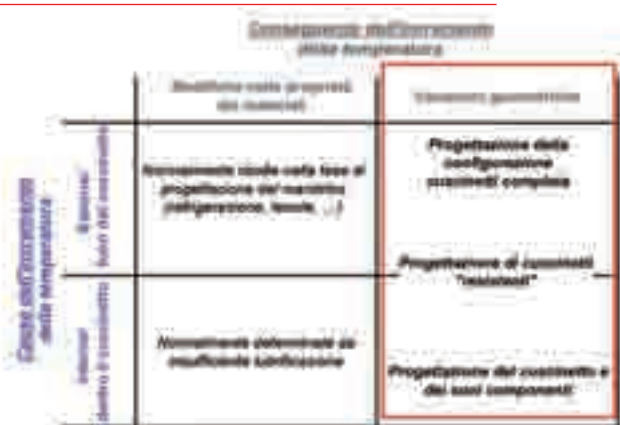
pacità di carico, tipica di sistemi di grandi dimensioni, unitamente a elevate velocità, tipiche di strutture di dimensioni contenute. Anche potendo risolvere questa contraddizione, la sfida principale per l'incremento prestazionale è costituita dalle dinamiche termiche interne al mandrino. Anche se le temperature assolute sono ancora "gestibili", le differenze di temperatura nel mandrino diventano sempre più critiche e inducono variazioni geometriche nei componenti, come mostrato in figura 1.

Considerando i campi di tolleranza molto ristretti necessari per mandrini e cuscinetti, il controllo delle dinamiche termiche diventa una delle sfide più importanti nella progettazione dei sistemi.

L'impatto della temperatura

I cuscinetti rappresentano uno dei punti deboli del mandrino. I requisiti di alta velocità e pre-

Le moderne macchine utensili e i componenti devono essere robusti e flessibili e ai nuovi mandrini si richiede, ad esempio, elevata rigidità e capacità di carico unitamente a elevate velocità. Considerando i campi di tolleranza molto ristretti necessari per mandrini e cuscinetti, il controllo delle dinamiche termiche diventa una delle sfide più importanti nella progettazione dei sistemi mandrino



2. Analisi delle sorgenti di calore e delle conseguenze dell'aumento di temperatura.

co flottante compensa l'espansione assiale che non costituisce, quindi, criticità. Per applicazioni HPC (ad es. fresatura HPC) spesso si adottano configurazioni rigide, ad "O", tra i cuscinetti anteriori e posteriori, in cui le dilatazioni non possono più essere compensate essendo l'intero sistema precaricato. Per risolvere questo problema, esiste una "distanza cuscinetti termicamente neutra" che permette di compensare le dilatazioni assiali e radiali attraverso il cuscinetto. Per spiegare questo effetto analizziamo

cisione hanno richiesto miglioramenti continui, come tolleranze geometriche più ristrette, migliore finitura superficiale e nuovi materiali. Ciononostante, il surriscaldamento costituisce ancora un serio pericolo per le prestazioni del cuscinetto e del mandrino. L'analisi di soluzioni idonee a evitare o gestire tale fenomeno deve partire da considerarne le possibili conseguenze e identificare le sorgenti di calore.

Le conseguenze possono essere (figura 2):

- variazioni nelle proprietà dei materiali, anche se accorgimenti come la refrigerazione e il sistema di lubrificazione permettono di portare a regime la temperatura molto al di sotto dei 100 °C;
- espansione dei componenti, secondo la legge specifica di ogni materiale. Considerando le tolleranze ristrette dei cuscinetti per mandrino, minime variazioni di temperatura possono causare pesanti innalzamenti dei carichi all'interno dei cuscinetti.

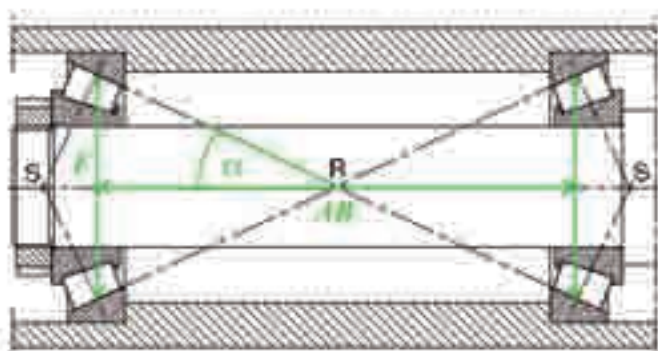
Le sorgenti di calore in un mandrino possono essere:

- esterne al cuscinetto. La più importante è costituita dal motore elettrico, spesso integrato nel mandrino. L'albero è utilizzato come rotore e i cuscinetti sono normalmente collocati molto vicino al motore, davanti e dietro, ricevendo gran parte del calore generato;
- interne al cuscinetto. L'attrito dei componenti del cuscinetto stesso (corpi volventi, gabbie ed anelli).

Seguendo la maggiore rilevanza pratica, ci si focalizzerà ora sulle conseguenze delle variazioni geometriche.

Approcci ingegneristici

Focalizzeremo ora tre approcci generali dell'ingegneria dei cuscinetti per mandrino, che con-



3. Teoria della "configurazione cuscinetti termicamente neutra".

ducono a quanto illustrato in figura 2:

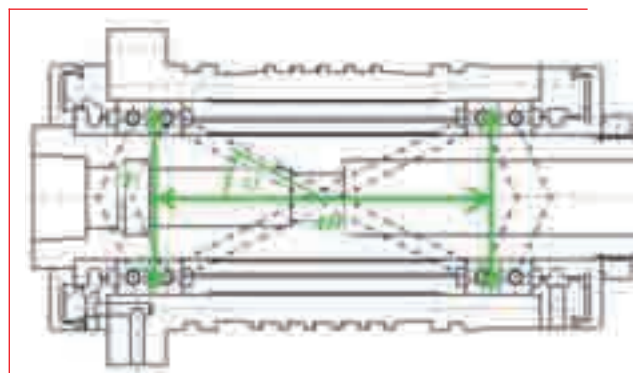
- concezione della configurazione cuscinetti ("linea mandrino"),
- progettazione di cuscinetti resistenti (esterno),
- progettazione del cuscinetto e dei suoi componenti (interno).

La progettazione del mandrino include l'analisi di molte questioni, come quali e quanti cuscinetti usare, come allinearli e dove collocarli, alla maggior parte delle quali la letteratura già fornisce risposta. Fondamentale è studiare la collocazione "ottimale" dei cuscinetti, poiché ha un enorme impatto sulle derivate termiche interne al mandrino.

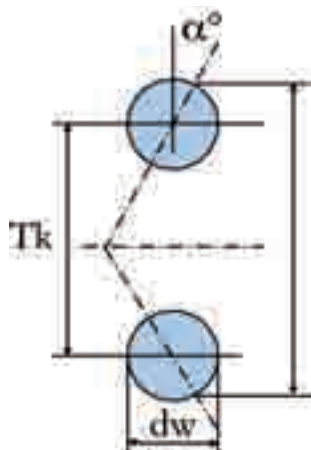
Per lavorazioni come tornitura o rettifica, la configurazione tipica prevede un banco cuscinetti anteriore di riferimento e uno posteriore flottante. In tali applicazioni il banco

un'applicazione elementare con cuscinetti a rulli conici: le espansioni termiche radiale e assiale dell'albero, solidale con gli anelli interni e i corpi volventi, sono identiche se la proiezione delle piste di rotolamento è incidente in un unico punto sull'asse di rotazione (il punto R in figura 3), anche se il corpo e gli anelli esterni rimangono "freddi".

In teoria, le dilatazioni termiche assiale e radiale dell'albero sono identiche, in pratica il gioco o precarico del set di cuscinetti varia lievemente. La distanza termicamente neutra AB si ricava da:



4. Configurazione cuscinetti termicamente neutra per cuscinetti a sfere per mandrini.



$$F = \cos \alpha \times dw + Tk$$

5. Determinazione del diametro di contatto F.

α : angolo di contatto

F: Ø contatto sfera-anello est.

Tk: Ø primitivo

dw: Ø sfera

$$\tan \alpha = \frac{F/2}{AB/2} = \frac{F}{AB} \Leftrightarrow AB = F \cdot \cot \alpha \quad (1)$$

Le applicazioni HPC richiedono velocità elevate e i cuscinetti a rulli conici sono stati sostituiti da cuscinetti per mandrini a contatto obliquo, con angoli di contatto a tipicamente 15° e 25°, che consentono di sfruttare ancora tale proprietà (figura 4).

L'equazione per calcolare la distanza termicamente neutra AB è la stessa.

Il parametro F, identificato ora dal diametro tra le areole di contatto tra le sfere e l'anello esterno (figura 5), diventa:

$$F = \cos \alpha \cdot dw + Tk \quad (2)$$

dove:

α : angolo di contatto,

F: contatto sfera-anello esterno,

Tk: Ø primitivo,

dw: Ø sfera.

Calcoli approfonditi e l'esperienza pratica dimostrano che questo valore ammette tolleranze di +/- 10%. Per un angolo di contatto di 25°, si può approssimare la distanza termicamente neutra come:

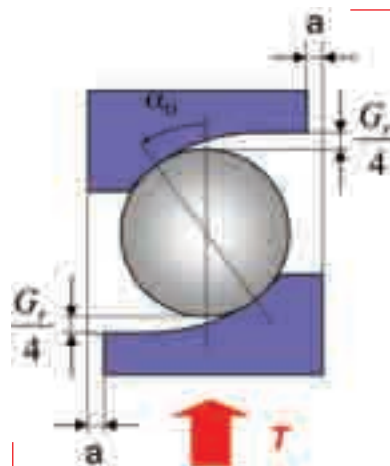
$$AB = 3 \cdot d \quad (3)$$

essendo d il diametro interno del cuscinetto.

Progettazione di cuscinetti resistenti

Per aumentare la "resistenza termica" di un cuscinetto per mandrini è necessario partire dal progetto concettuale.

La figura 6 mostra la sezione e le relazioni geometriche tra i parametri di un cuscinetto.



6. Caratteristiche del cuscinetto.

$$\cos(\alpha_0) = 1 - \frac{G_r}{2 \cdot k \cdot D_w}$$

α_0 : angolo di contatto

G_r : gioco radiale

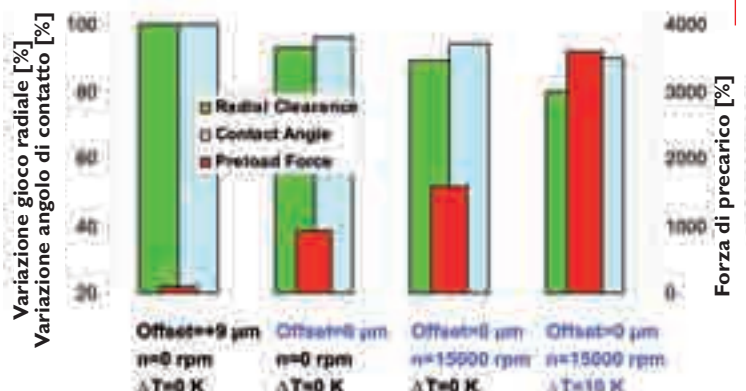
D_w : diametro sfera

a: salto facciale

Definendo il rapporto specifico di curvatures del cuscinetto k come:

$$k = \frac{\text{raggio gola pista} - \text{raggio sfera}}{\text{raggio sfera}} \quad (3)$$

7. Influenza delle differenze di temperatura e velocità su un cuscinetto (esempio HCS7014E.T.P4S. UL).



l'angolo di contatto è dato da:

$$\cos(\alpha_0) = 1 - \frac{G_r}{2 \cdot k \cdot D_w} \quad (4)$$

dove:

α_0 : angolo di contatto,

G_r : gioco radiale,

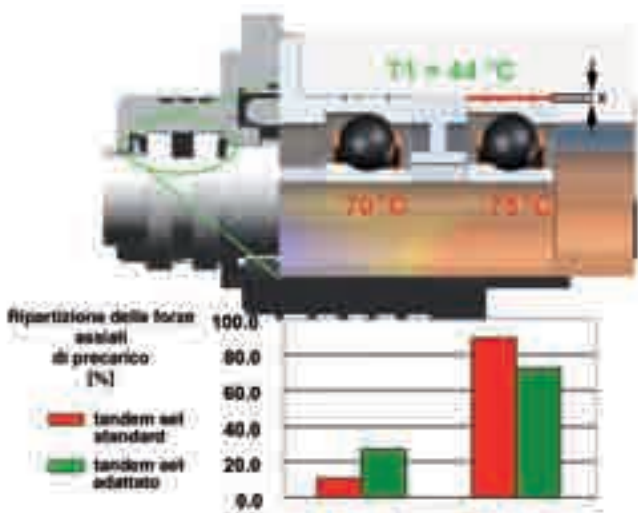
D_w : diametro sfera,

a: salto facciale.

A mandrino montato, i cuscinetti sono chiusi "a pacco", azzerando il salto facciale a per ottenere la condizione specifica di precarico. Come mostrato dall'equazione (4), l'angolo di contatto dipende linearmente dal gioco radiale G_r . Aumentando le temperature e le differenze di tem-

peratura tra i componenti, nelle differenti condizioni, variano la geometria e la posizione relativa dei componenti del cuscinetto. L'angolo di contatto può quindi mutare significativamente. Durante la lavorazione, l'albero e l'anello interno si riscaldano, dilatandosi, normalmente più del corpo. Di conseguenza G_r e l'angolo di contatto si riducono,

essendo D_w e k praticamente costanti. Quando il sistema è in rotazione, le forze centrifughe della sfera amplificano questo effetto. Come conseguenza il precarico, l'attrito e la temperatura del cuscinetto aumentano, riducendone la vita. Possibili conseguenze pratiche di questi effetti per i cuscinetti per mandrino sono dimostrate in



8. Effetto della temperatura sui set di cuscinetti (esempio).

zione delle condizioni di precarico, rigidità ed adattabilità è un campo di ricerca attualmente attivo.

Progettazione del cuscinetto e dei suoi componenti

Analizziamo ora l'ottimizzazione delle condizioni di attrito interno del cuscinetto al fine di contenere la potenza dissipata e l'aumento di temperatura. A tale scopo si devono considerare i componenti del cuscinetto: anelli, corpi volventi (in questo caso: sfere) e gabbia.

Negli ultimi anni l'attrito volvente è stato notevolmente ridotto, ad esempio migliorando le superfici delle sfere e delle piste di rotolamento, ottimizzando la lubrificazione, introducendo corpi volventi ceramici e nuovi acciai (ad es. Cronidur). Analizziamo ora l'attrito delle gabbie, che coinvolge due aspetti:

- l'interazione della gabbia sulla superficie di guida dell'anello esterno,
- l'interazione tra le sfere e la gabbia.

Considerando i cuscinetti a sfere per mandrini, il fattore principale di attrito è costituito dalla guida della gabbia, normalmente sulla superficie dell'anello esterno (figura 9).

Quando il cuscinetto è in rotazione, la gabbia appoggia su un

...

...

...

...

...

...

...

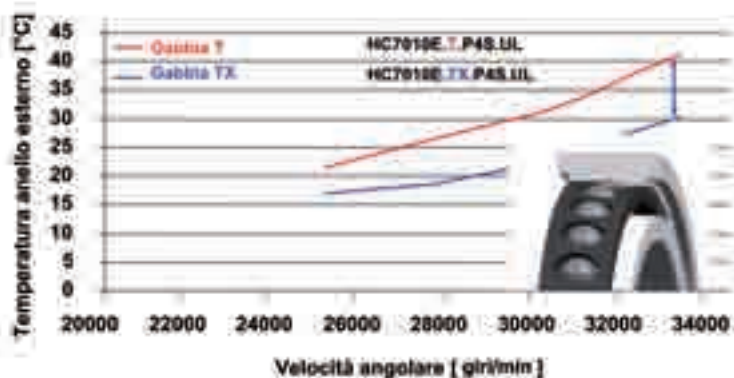
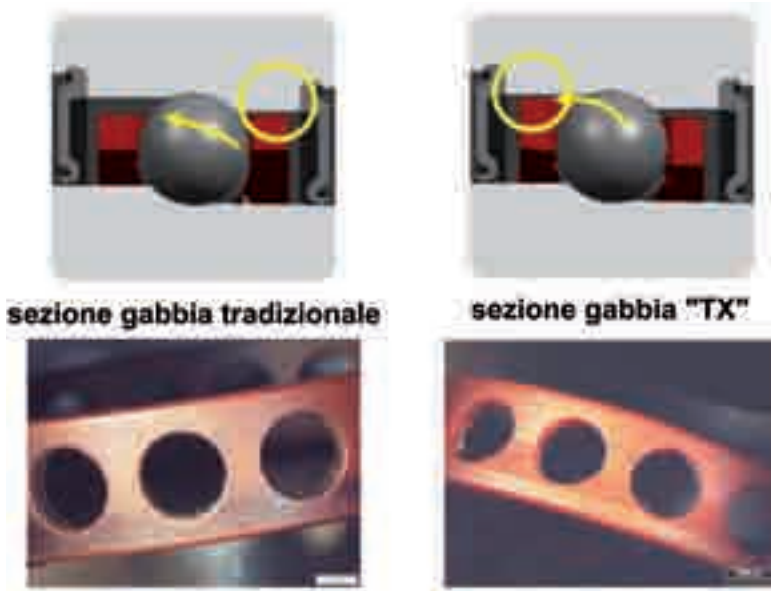
...

...

...

...

9. Miglioramenti nel progetto della gabbia.



10. Effetto della nuova gabbia (esempio cuscinetto HC7010.T.P4S.UL).

figura 7. Ne deriva che, per superare questi vincoli, il cuscinetto dovrebbe avere "adattabilità radiale", per consentire il riscaldamento evitando la riduzione del gioco radiale. L'effetto negativo del riscaldamento si esalta considerando set di cuscinetti (figura 8): il cuscinetto adiacente al motore si riscalda maggiormente di quello più lontano e quindi risulta più precaricato. Il diagramma in figura 8 è stato calcolato per il mandrino di figura 1. La condizione di lavoro ad alta velocità determina una distribuzione di precarico fortemente nociva per il banco cuscinetti anteriore: il 10% del precarico agisce sul primo cuscinetto mentre il 90% si scarica su quello adiacente al motore. L'adattabilità radiale fornisce una soluzione per tali casi. L'anello esterno del cuscinetto adiacente al motore è stato ribassato di alcuni micron.

Il cuscinetto conserva le condizioni di lavoro e di velocità ma acquisisce libertà alla dilatazione e quindi "adattabilità radiale" ad elevata velocità e temperatura del motore. La rigidità assiale, assicurata dal salto facciale standard, è inalterata. Per le lavorazioni ad alta velocità la distribuzione del precarico nel set può essere ottimizzata a quasi 30% sull'anteriore e 70% sul cuscinetto vicino al motore. Non è possibile uniformare poi-

ché la temperatura del cuscinetto adiacente al motore rimane più elevata. Per fare ciò si dovrebbe considerare anche la variazione assiale in dotta di temperatura degli anelli. L'ottimizza-

punto del suo diametro che slitta lungo la superficie. Tale slittamento è supportato dalla lubrificazione del cuscinetto. La direzione di trasporto del lubrificante in questo punto è mostrata

in figura 9 dalla freccia gialla ed è determinata dalle forze centrifughe e dalla rotazione della sfera. Questa direzione di trasporto non è ovviamente ottimale per supportare lo strisciamento della gabbia, e l'effetto peggiora per i cuscinetti schermati, come mostrato in figura, poiché lo spazio per un deposito di grasso tra gabbia e tenuta è molto ridotto. La fotografia in basso a sinistra di figura 9 mostra la gabbia standard con un'evidente marcatura causata dall'elevato attrito ed una cattiva lubrificazione. Il lato destro della figura illustra la nuova gabbia, definita "TX" da FAG, sviluppata per ridurre l'attrito. Tale gabbia è guidata sull'angolo di entrata dell'anello esterno, ottimizzando quindi la lubrificazione del punto di contatto sull'anello esterno. Migliorando la qualità delle superfici dell'anello esterno e della gabbia, l'attrito si riduce ulteriormente. Misurazioni ed esperienze hanno evidenziato riduzioni del 10% nella temperatura di funzionamento e nell'attrito, rispetto alla gabbia standard (figura 10).

Prospettive

Considerando la velocità dello sviluppo delle HPC, ulteriori sviluppi dovranno essere presu-

mibilmente orientati verso l'ottimizzazione del sistema mandrino globale (ad es. della refrigerazione), dei cuscinetti (l'adattabilità assiale, ulteriori riduzioni di attrito), dei dispositivi esterni al mandrino (alimentazione elettrica e contenimento della potenza dissipata dal motore).

readerservice.it n. 74

Bibliografia

- [1] Klocke, F., Basics of HPC and Resulting Mechanical and Thermal Characteristics. In: CIRP Conference "International High Performance Cutting (HPC)", Aachen, October 19-20, 2004.
- [2] Schellberg, O., Laugisch, G., Hohe Praezision fuer hohe Leistungen! Auslegung von Hauptspindellagerungen am Limit des Werkzeug- und Formenbaus, „3D-Erfahrungsforum“, Berlin, May 17-18, 2006.
- [3] Voll, M., Rechnerische Modellierung von Hauptspindellagerungen, „Gestaltung von Spindel-Lager-Systemen“, Aachen, March 9-10, 2006.

O. Schellberg, Head Of Product Line Spindle Bearings, Schaeffler Group Industrial.

M. Voll, Head Of Application Engineering Spindle Bearings, Schaeffler Group Industrial.

A. Massola, Sector Management Department, Schaeffler Italia Srl.

chen, March 9-10, 2006.

[4] Abele, E., Schiffler, A., 2006, Vorteile durch kombinierte Wälz-Magnet-Lager, in: *Produktion*, 24. August 2006, Nr. 33/34, p. 16.

[5] Weck, M., *Werkzeugmaschinen Konstruktion und Berechnung*, Berlin, 2002.

[6] Braendlein, J., Eschmann, P., Hasbargen, L., Weigand, K., *Die Waelzlagerepraxis*, Mainz 2002.

[7] Brecher, C. et al., Spitzentechnologie im Werkzeugmaschinenbau – innovativ und bedarfsgerecht, in: *Wettbewerb-sfaktor Produktionstechnik*, Aachen, 2005.



PUJOL Motoriduttori

www.pujol.com commerciale@pujol.com



MOTORIDUTTORE ORTOGONALE

Serie KX

Rapporto di riduzione da 6 a 210 ■■

Coppia in uscita da 140Nm a 9000Nm ■■

Albero uscita cavo da diam. 30mm a 90mm ■■

A richiesta: flangia laterale, albero normale in uscita, calettatore, bracci di reazione... ■■









PUJOL MUNTALÀ Italia Div. Motoriduttori Via dell'Industria, 141 - 41043 Formigine (MO) Tel. 059 570682 Fax 059 5750408

readerservice.it n.18533