

TECNOLOGIA

Monografia
di 8 pagine

Hannover Messe,
aprile 2015:
Alrik Danielson,
President e CEO
del Gruppo SKF
presenta l'SKF
EnCompass Field
Performance
Programme e l'SKF
Generalized Bearing
Life Model.



Importante passo avanti nei modelli di durata

All'ultima Hannover Messe (aprile 2015), Alrik Danielson, President e CEO del Gruppo SKF e Bernd Stephan, Vicepresidente Senior del Group Technology Development SKF, hanno presentato il modello generalizzato SKF della durata dei cuscinetti (SKF Generalized Bearing Life Model, GBLM), un modello innovativo studiato per calcolare la durata utile dei cuscinetti in modo più realistico. Per l'industria esso rappresenta un importante passo avanti e giocherà un ruolo primario nel consentire agli OEM e agli utilizzatori finali una migliore sinergia tra cuscinetti e applicazioni, per una maggiore durata di esercizio delle macchine e riduzione dei costi operativi.

SVILUPPATO NELL'AMBITO dell'SKF EnCompass Field Performance Programme, il nuovo modello sfrutta i punti forti di quello attuale – relativo alla durata dei cuscinetti ed elaborato dalla SKF oltre trent'anni fa – riuscendo a separare efficacemente l'effetto di cedimento sulla superficie da quello sotto la superficie. Con l'inclusione di più parametri, questo modello offre nuove opportunità nel calcolo della durata dei cuscinetti.

Interviste giornalieri in diretta concesse dagli esperti GBLM, illustrazioni del metodo di calcolo mediante software dimostrativo e colloqui con clienti e giornalisti hanno caratterizzato il lancio del nuovo modello di calcolo alla Hannover Messe. Il modello è stato accolto con favore dai presenti e ha ravvivato l'interesse alle problematiche della durata dei cuscinetti. Qui di seguito ne illustriamo i fondamenti. →

Il modello generalizzato SKF della durata, potenza della tribologia

FINORA, LA VALUTAZIONE della durata dei cuscinetti volventi è sempre stata basata su modelli che considerano una sollecitazione equivalente, che ha origine sotto alla superficie di contatto e che viene applicata all'intero volume sollecitato nel contatto volvente. Nel corso degli anni, nella stima della durata si è tenuto conto della fatica che ha origine sulla superficie delle piste e che è causata da contaminazione o da un'insufficiente lubrificazione, mediante l'uso di fattori penalizzanti applicati alla sollecitazione equivalente complessiva nel contatto volvente. Nell'SKF GBLM, questo problema è affrontato in modo nuovo, introducendo un approccio generalizzato per il calcolo della durata, secondo il quale, il danneggiamento che ha origine in superficie del contatto è esplicitamente formulato e inserito nelle equazioni alla base del calcolo a fatica del cuscinetto. Questa nuova formulazione ha la capacità di rappresentare meglio la tribologia dei cuscinetti nei calcoli di durata. Inoltre fornisce migliori conoscenze in merito alla durata delle superfici delle piste che è il fattore predominante nelle prestazioni sul campo dei cuscinetti stessi. Nell'articolo è discussa la capacità del nuovo metodo di tenere conto della tribologia e dei meccanismi concomitanti di fatica superficiale e

sotto-superficiale che avvengono nei contatti volventi.

CORRETTAMENTE impiegati e lubrificati, i moderni cuscinetti volventi sono sempre più affidabili. Questo avviene grazie alle buone procedure di lavoro, alle conoscenze tradizionali dei meccanismi di affaticamento nei contatti volventi, all'impiego di materiali più puri e alle buone qualità di fabbricazione, che sono abbinate a metodi affidabili di calcolo della durata. Tuttavia, la tendenza dell'industria a ridurre le dimensioni e a richiedere maggior efficienza di esercizio, impone ai cuscinetti condizioni di lavoro più gravose, specialmente sulle superfici di contatto, tanto che oggi la maggior parte dei guasti si verifica appunto sulle superfici di rotolamento [1]. Affinché i cuscinetti volventi non diventino un fattore limitante del miglioramento delle prestazioni delle macchine moderne, si deve valutare meglio l'impatto della tribologia delle superfici di contatto sulle prestazioni dei cuscinetti stessi. Nell'ultimo decennio, la SKF ha fatto progressi sostanziali nel settore della tribologia e della modellazione della durata delle superfici a contatto [2-8]. Ora, con l'introduzione del modello generalizzato SKF della durata (GBLM) è possibile finalmente integrare le conoscenze acquisite nei calcoli di

durata [9]; il nuovo modello GBLM considera separatamente le zone superficiali da quelle sotto la superficie del contatto volvente: in questo modo nelle due zone si possono applicare modelli fisici differenti. La fatica da contatto volvente sotto la superficie può essere trattata nel modo usuale seguendo il modello classico delle capacità di carico dinamico di Lundberg e Palmgren [10], mentre il trattamento delle superfici delle piste esige modelli tribologici avanzati, che tengano conto delle complesse interazioni fisiche presenti nei contatti hertziani fortemente sollecitati, come ad esempio lubrificazione, attrito, usura, fatica o rodaggio.

Tutto questo consente alla SKF, di qualificare meglio le prestazioni di durata di nuove soluzioni cuscinetto specificamente sviluppate per un miglioramento delle prestazioni di esercizio delle applicazioni. Ne sono esempi i cuscinetti con speciali trattamenti termici, disegno innovativo o micro-geometrie superficiali avanzate o di particolari qualità.

Nei calcoli di durata clienti e utilizzatori di cuscinetti potranno trarre vantaggio dalle caratteristiche uniche dei prodotti SKF, sfruttandone al meglio la qualità, che oggi non può più essere semplicemente rappresentata dalla capacità di carico dinamico "sotto-superficiale" (C), come avviene attualmente [11].

La caratteristica del nuovo approccio nel trattare in modo molto specifico i meccanismi di degradazione e la tribologia della superficie delle piste consentirà l'uso di versioni avanzate di calcolo GBLM nello sviluppo di nuove soluzioni progettuali di cuscinetti volventi.

Per realizzare cuscinetti di disegno migliorato per applicazioni speciali o con particolari esigenze, gli ingegneri SKF hanno ora a disposizione uno strumento moderno e flessibile per la valutazione delle prestazioni dei cuscinetti, in grado di incorporare le nuove conoscenze e tecnologie che sono sviluppate dalla ricerca

L'approccio di modellazione generalizzato

Il presente modello conserva l'approccio probabilistico standardizzato seguito finora per il calcolo della durata dei cuscinetti, basato su una distribuzione bi-parametrica di Weibull, come trattato in [12]. Waloddi Weibull [13], con la teoria dell'anello più debole, introdusse concetti stocastici nella determinazione della resistenza e rottura degli elementi strutturali.

Se una struttura è composta da n elementi soggetti a differenti stati di sollecitazione, quindi con una diversa probabilità di sopravvivenza S_1, S_2, \dots, S_n seguendo la legge dei prodotti delle affidabilità, la probabilità che l'intera struttura sopravviva è data dall'equazione (1)

Lundberg e Palmgren nella loro classica formulazione originaria del coefficiente di carico dinamico dei cuscinetti volventi [10] applicarono la legge dei prodotti delle affidabilità di Weibull, equazione (1), per ricavare la funzione di sopravvivenza di una struttura costituita da n elementi fisici indipendenti che

tiene conto del processo di degradazione da 0 a N cicli di carico, equazione (2).

Il volume V può essere suddiviso in due o più fonti indipendenti di rischio di guasto per la struttura, considerando G come la funzione di degradazione del materiale rappresentante l'effetto di accumulo dei cicli di carico (fatica). Pertanto, si possono caratterizzare zone con funzioni di degradazione differenziate che possono essere descritte mediante un singolo o con multipli processi di degradazione $G_{v,1}, G_{v,2}, \dots, G_{v,n}$. Il loro effetto combinato, sulla sopravvivenza dell'intera struttura, può essere espresso con l'equazione (2). Tuttavia, considerando ora solamente due zone, una, quella sotto la superficie del contatto (zona v) e l'altra quella della superficie del contatto (zona s), si può ottenere l'equazione (3).

Secondo [14] l'integrale del volume di danneggiamento a fatica si può ottenere utilizzando l'ampiezza di sollecitazione σ_v originata dal campo di sollecitazioni hertziano, equazione (4).

Nell'equazione c e h sono esponenti, e rappresenta la pendenza di Weibull per la zona sotto la superficie, N è la durata del contatto in numero di cicli di carico, z rappresenta la profondità di analisi, V_v è il volume di integrazione, $\sigma_{u,v}$ è la sollecitazione limite di fatica nel volume e \bar{A} è una costante.

In modo simile si può riscrivere la funzione del danneggiamento in superficie. Se si include la costante \hat{h} (ved. figura 1) nella costante di proporzionalità \bar{B} del danneggiamento in superficie si ottiene l'equazione (5).

In questa, m è la pendenza di Weibull per la superficie, A è la

→

$$S_1^n = S_1 \cdot S_2 \cdot \dots \cdot S_n = \prod_{i=1}^n S_i \quad (1)$$

$$\ln \left[\frac{1}{S(N)} \right] = \ln \left[\frac{1}{\Delta S_1(N)} \right] + \ln \left[\frac{1}{\Delta S_2(N)} \right] + \dots + \ln \left[\frac{1}{\Delta S_n(N)} \right] \quad (2)$$

$$\ln \left[\frac{1}{S(N)} \right] = \int_{V_v} G_v(N) dV_v + \hat{h} \int_A G_s(N) dA \quad (3)$$

$$\int_{V_v} G_v(N) dV_v = \bar{A} N^e \int_{V_v} \frac{\langle \sigma_v - \sigma_{u,v} \rangle^c}{z^h} dV_v \quad (4)$$

$$\hat{h} \int_A G_s(N) dA = \bar{B} N^m \int_A \langle \sigma_s - \sigma_{u,s} \rangle^c dA \quad (5)$$

superficie di integrazione, $\sigma_{u,s}$ è il limite di fatica in superficie e B è una costante.

Nella funzione di danneggiamento superficiale dell'equazione (5) le sollecitazioni σ_s vanno ricavate dalla geometria effettiva delle superfici in contatto e dalle sollecitazioni di attrito.

Ora, combinando le equazioni (4) e (5) con la (3), è possibile ottenere un'equazione della durata del contatto con termini distinti per gli effetti sulla superficie e quelli sotto-superficiali del contatto hertziano. Si noti che la durata in numero di giri del cuscinetto può essere messa in relazione al numero di cicli di carico N con la $L = N/u$, dove u è il numero di cicli di carico durante una rotazione completa del cuscinetto. Considerando che le due pendenze di Weibull sono molto simili ($e = m$), com'è il caso per i cedimenti iniziati sulla superficie delle piste, alla fine abbiamo l'equazione (6).

Questo rappresenta la base per un modello di durata dei cuscinetti che separa esplicitamente la superficie dalla zona sotto-superficiale del contatto. Il termine relativo a quest'ultima, rappresentato dall'integrale di volume, può essere risolto come in [14] con l'utilizzo delle tradizionali tecniche della fatica da contatto volvente hertziano. Tuttavia, il termine relativo alla superficie, rappresentato

dall'integrale di area, offre ora la possibilità di includere nel modello di calcolo, in modo coerente e rigoroso, molti dei fenomeni prettamente tribologici che caratterizzano la durata della superficie delle piste.

Naturalmente, in questo sviluppo occorre usare modelli numerici avanzati. In effetti, bisogna rappresentare le interazioni complesse tra i meccanismi di degradazione che sono in competizione l'uno con l'altro. Per esempio: 1) la fatica superficiale in combinazione con l'usura moderata, 2) l'evoluzione delle impronte, 3) le interazioni tribologiche, ecc. In fig. 1 è rappresentato schematicamente il concetto di base del calcolo GBLM.

Modelli per la superficie

In [5] è descritto un modello numerico di affaticamento della superficie che combina la fatica con l'usura moderata; esso richiede come dati d'ingresso le mappe digitali della rugosità delle superfici in contatto (fig. 2) e risolve numericamente il problema elastodinamico della lubrificazione mista (con reologia non-newtoniana).

La soluzione si ottiene in step temporali per il calcolo delle pressioni e sollecitazioni del contatto. Il modello di calcolo applica un criterio di danneggiamento e un modello di usura per aggiornare la

topografia delle superfici e procedere al successivo step fino a che non sia terminato il completo ciclo dei carichi di rotolamento del corpo volvente (overrolling). Questo procedimento numerico viene ripetuto milioni di volte per tutti i punti della superficie interessati al calcolo. In tal modo si ha una buona simulazione dei fenomeni fisici del processo di accumulo del danno da usura/fatica della superficie per un dato numero di passaggi del corpo volvente. In fig. 3 sono illustrati i risultati tipici di questo modello numerico; la simulazione numerica del danno è confrontata con i risultati sperimentali di test eseguiti nelle stesse condizioni della simulazione.

In [3, 6, 7] sono indicati altri modelli di danno di superficie che si possono usare integrandone i risultati in ambito GBLM. Come esempio di flessibilità del GBLM nell'integrare modelli avanzati di danneggiamento superficiale consideriamo il modello di affaticamento della superficie descritto in [5]. Per chiarezza ci si limita solo a questo caso. Questo modello è stato usato per eseguire uno studio parametrico partendo da diverse condizioni di lavoro, dalla rugosità di cuscinetti di vario tipo e dimensione e da vari regimi di lubrificazione e contaminazione [9]. In questo studio l'integrale dell'affaticamento superficiale è stato normalizzato adattando una funzione dei parametri del cuscinetto, ved. l'equazione (7).

In questa funzione f_1, f_2, \dots, f_5 sono costanti, P è il carico dinamico equivalente sul cuscinetto e P_u è il carico limite di fatica del cuscinetto. Il parametro R_s rappresenta l'entità del rischio di danno superficiale: in altre parole è la misura dell'entità delle

$$L_{1-S} = \frac{[\ln(\frac{1}{S})]^{1/e}}{u} \left[\bar{A} \int_{V_v} \frac{\langle \sigma_v - \sigma_{u,v} \rangle^c}{z^h} dV_v + \bar{B} \int_A \langle \sigma_s - \sigma_{u,s} \rangle^c dA \right]^{1/e} \quad (6)$$

$$R_s = f_1 \exp \left[\frac{f_2}{(P/P_u)^{f_3}} + \frac{f_4}{(P/P_u)^{f_5}} \right] \quad (7)$$

sollecitazioni di superficie delle piste di rotolamento.

Utilizzando il modello avanzato di affaticamento superficiale, si possono calcolare le diverse condizioni di lubrificazione e contaminazione del cuscinetto, derivando l'effetto sulla probabilità di sopravvivenza della superficie. In tal modo, introducendo il parametro $\eta = \eta_b \eta_c$ [3] (per indicare il rischio di interazione delle superfici) si può ottenere una rappresentazione dell'equazione (7) in funzione del rapporto P_u/P per un particolare tipo di cuscinetto, ved. la fig. 4.

Fattori di prestazione

Si possono valorizzare le caratteristiche peculiari dei cuscinetti SKF usando la metodologia sopra discussa per ricavare "fattori di prestazione" specificamente studiati. Essi servono per quantificare i miglioramenti delle prestazioni del cuscinetto dotato di particolari caratteristiche di disegno o funzionate sotto specifiche condizioni di lavoro.

Normalmente, questi fattori valgono ad esempio per superfici sottoposte a nuovi trattamenti termici o per materiali con migliorata durezza delle piste, per l'uso di rivestimenti di queste, per miglioramenti della microgeometria e della finitura delle piste stesse. Tuttavia nel futuro l'uso di specifici fattori di prestazione potrà essere esteso anche alla zona sotto la superficie oltre che a particolari aspetti dei lubrificanti o della lubrificazione. In sostanza, la struttura del GBLM consente di incorporare le nuove tecnologie e conoscenze delle prestazioni dei cuscinetti man mano si rendano disponibili.

Come esempio di fattore di prestazione riguardo alla probabilità →

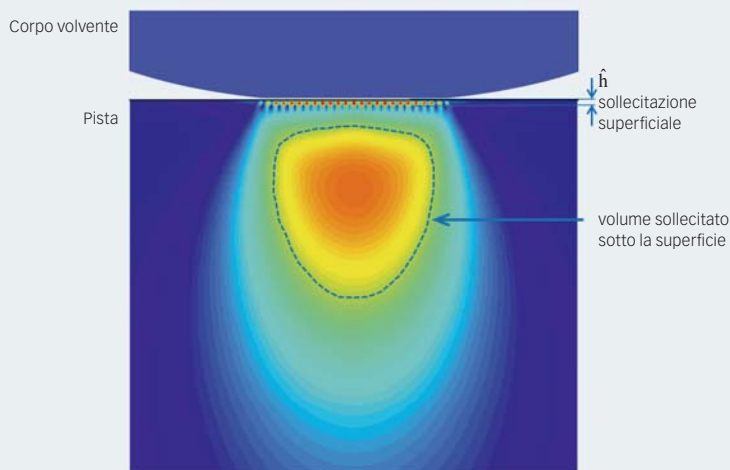


Fig. 1: Separazione tra le zone in superficie e sotto la superficie proposta dal GBLM.

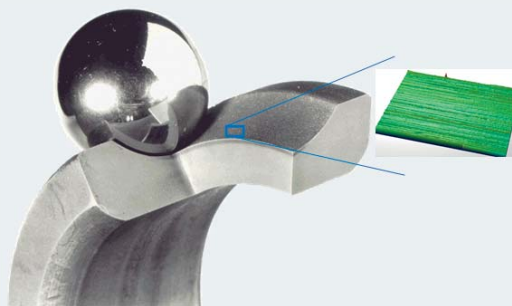
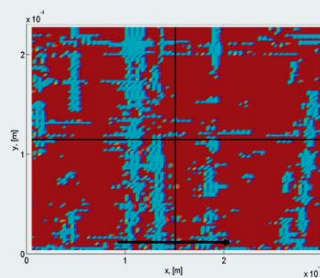


Fig. 2: Digitalizzazione della rugosità delle piste di un cuscinetto ottenuta con un profilometro ottico per la mappatura superficiale in 3D.



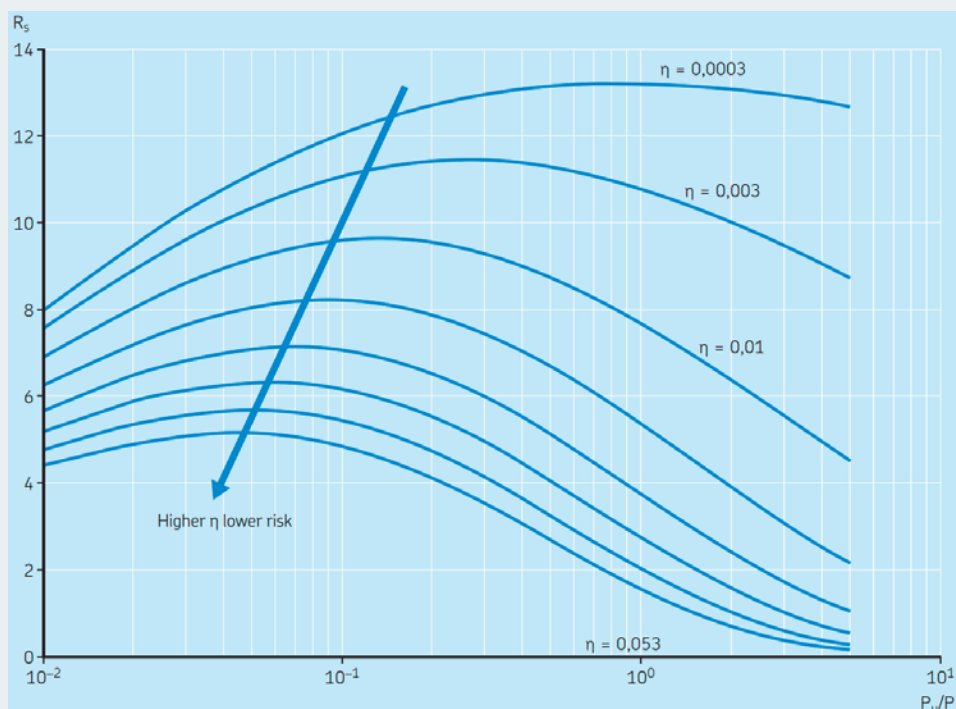
(a) Risultato da modello



(b) Risultato da esperimento

Fig. 3: Tipico affaticamento superficiale avanzato secondo [5].

Fig. 4: Esempio di rischio superficiale in funzione del carico e dei regimi di lubrificazione/contaminazione.



di sopravvivenza delle superfici, si può considerare il caso dell'introduzione di piste di maggiore durezza, ossia con migliore resistenza ad usura e contaminazione, specie con lubrificazione carente. La conoscenza delle migliori prestazioni prevedibili per la durata delle piste può essere introdotta nel calcolo della durata dell'equazione (7), usando un fattore di prestazione che riduce il rischio di danno superficiale, come illustrato in fig. 5.

Si noti che in questo caso il fattore di prestazione è stato sviluppato per trattare solo una certa regione delle condizioni operative del cuscinetto. Come indicato in fig. 5, la riduzione di rischio più significativa è nella zona più esposta della superficie – alti valori R_s ; con l'aumento del parametro η , la riduzione del

rischio diminuisce e così anche l'influenza del fattore di prestazione sulla durata del cuscinetto. Questo dimostra la capacità del fattore prestazione GBLM di indirizzare condizioni operative specifiche per le quali la riduzione del rischio per la superficie è più importante.

Rischio normalizzato

Dato che il GBLM è capace di separare i termini di durata della superficie e quelli della zona sotto la superficie, è possibile valutarne l'impatto sulle prestazioni dinamiche complessive del cuscinetto. Per esempio se si introduce: 1) l'integrale normalizzato della superficie o il rischio di danno superficiale R_s , 2) l'integrale normalizzato della sollecitazione sotto la superficie o il rischio di danno sotto la superficie

R_{ss} , e 3) il coefficiente di scala c , si può derivare il rischio normalizzato superficiale del cuscinetto, ved. equazione (8).

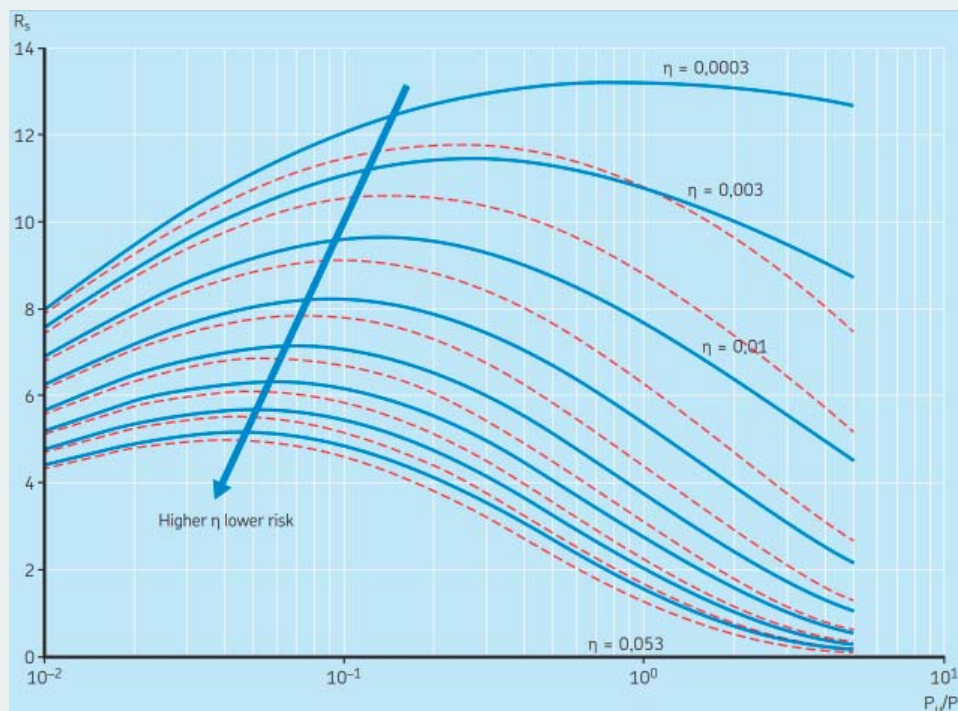
Questo parametro può variare da 0 a 1. Quando è prossimo a 1 il peso della fatica sulla superficie è predominante rispetto a quello nella zona sotto la superficie; quando è prossimo allo 0 vale l'opposto. Questo è un parametro importante per capire quale area è più sollecitata e a maggior rischio. Con tale informazione gli ingegneri SKF e i clienti possono prendere misure correttive per ottimizzare le prestazioni dei cuscinetti e ridurre i costi.

Conferma del modello

Quando le condizioni operative sono simili, il GBLM dà risultati conformi all'attuale durata utile SKF e, in larga misura, anche con i modelli di durata ISO 281. Questo perché il GBLM è stato convalidato confrontandolo con il vasto database dei risultati ottenuti nelle prove di durata SKF. Questo database

$$S_R = \frac{cR_s}{R_{ss}} \quad (8)$$

Fig 5: Esempio di rischio superficiale in funzione del carico e dei regimi di lubrificazione e contaminazione. Le linee tratteggiate rosse mostrano l'effetto di un fattore prestazione risultante dall'introduzione di un trattamento termico che conferisce una migliore durezza alla superficie delle piste.



viene aggiornato costantemente per seguire i nuovi sviluppi tecnologici.

L'introduzione dei fattori di prestazione in definitiva altererà le durate previste, tuttavia questo solo come conseguenza dell'introduzione di nuove soluzioni e innovazioni del disegno dei cuscinetti. La SKF esegue appropriati test di durata per confermare tali cambiamenti.

Vantaggi del GBLM per i clienti

I clienti possono trarre sensibili vantaggi dall'introduzione del GBLM nel calcolo della durata utile dei cuscinetti; infatti, nel calcolo della previsione di durata è aggiunta l'informazione riguardo al rischio di danneggiamento delle superfici. Nel caso in cui le condizioni di lavoro nelle applicazioni comportino appunto un rischio prevalente di questo genere, si possono prendere misure correttive quantificandone gli effetti. In altre parole, il GBLM costituisce uno strumento diagnostico utile a migliorare le

prestazioni sul campo dei cuscinetti riducendo i guasti che hanno origine sulle superfici delle piste.

In generale, ad un elevato rischio per le superfici conseguente ad una lubrificazione carente e a un aumento di contaminazione non si può porre rimedio con l'impiego di un cuscinetto con maggior capacità di carico o di maggiori dimensioni e questo può essere rapidamente verificato. Quindi per ottimizzare le prestazioni e ridurre il costo globale di un'applicazione il cliente può trarre beneficio dall'impiego del GBLM grazie a una scelta più documentata dei cuscinetti, dei componenti adiacenti e del sistema di lubrificazione.

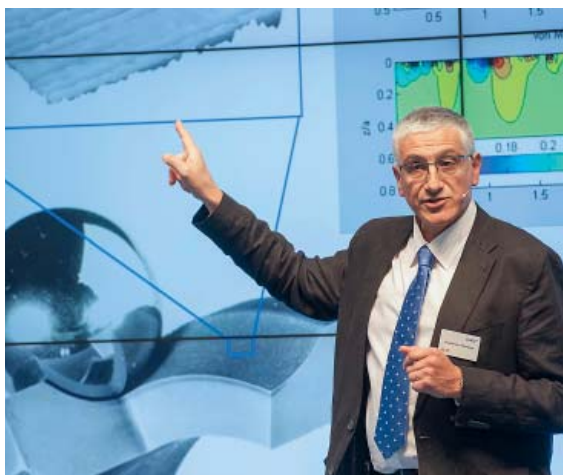
Sintesi e conclusioni

Con il modello generalizzato SKF della durata dei cuscinetti (GBLM) si rende disponibile un modo più flessibile per esprimere la durata dei cuscinetti stessi: esso prevede la separazione dei termini riferibili alle modalità di danneggiamento

delle zone superficiali da quelli più generali riferibili alla fatica nei contatti volventi delle zone sotto la superficie. Il modello introduce i fattori di prestazione e rende possibile personalizzare con maggiore precisione cuscinetti e applicazioni. Oltre che stimare la durata utile dei cuscinetti, esso calcola il valore S_R del rischio superficiale normalizzato che offre una chiara indicazione del peso dell'affaticamento superficiale rispetto a quello sotto la superficie.

In generale si possono trarre le seguenti conclusioni:

1. Il nuovo modello generalizzato SKF della durata dei cuscinetti consente una chiara distinzione tra i termini che hanno influenza sulle superfici e quelli che influenzano sulle zone sotto la superficie e può essere considerato un modo più flessibile per esprimere la durata dei cuscinetti SKF.
2. Nella sua formulazione questo modello di durata dei cuscinetti →



**Hannover Messe, aprile 2015:
Guillermo Morales-Espejel
presenta il modello generalizzato
SKF della durata dei cuscinetti.**

è l'unico esistente che contenga in modo esplicito termini separati riferiti alle zone superficiali e a quelle sotto le superfici e incorpori con facilità le conoscenze acquisite con l'impiego dei modelli tribologici numerici avanzati.

3. Elementi nuovi del modello sono i fattori di prestazione che tengono conto dei miglioramenti di disegno esclusivi SKF e/o delle caratteristiche di progetto che influiscono sulle prestazioni dei cuscinetti in un'applicazione in particolari condizioni operative.
4. Il GBLM può essere considerato una piattaforma di modelli in continua crescita man mano che si creano nuove conoscenze; esso consente di tenere conto dei fenomeni che influiscono in modo specifico sulle zone in superficie sotto la superficie dei cuscinetti.
5. Il modello generalizzato SKF della durata dei cuscinetti sarà reso disponibile in futuro anche per i clienti. ●

Autori:

Guillermo E. Morales-Espejel,
Principal Scientist, SKF Engineering & Research Centre, Nieuwegein, Olanda

Antonio Gabelli,
Senior Scientist, SKF Engineering & Research Centre, Nieuwegein, Olanda

Bibliografia

- [1] Gläntz W., *Contamination in Lubrication Systems for Bearings in Industrial Gear Boxes*, Ball Bearing Journal, 242, pp. 20-26, 1993.
- [2] Morales-Espejel, G.E., Gabelli, A., Ioannides, E., *Micro-geometry Lubrication and Life Ratings of Rolling Bearings*, Proc. IMechE, Part C, J. of Mech. Eng. Sci., vol. 224, pp. 2610-2626, 2010.
- [3] Gabelli, A., Morales-Espejel, G.E., Ioannides, E., *Particle Damage in Hertzian Contacts and Life Ratings of Rolling Bearings*, Trib. Trans., 51, pp. 428-445, 2008.
- [4] Morales-Espejel, G.E., Gabelli, A., Ioannides, E., *Micro-Geometry Lubrication and Life Ratings of Rolling Bearings*, Proc. IMechE, 224, Part C: J. of Mech. Eng. Sci., pp. 2610-2626, 2010.
- [5] Morales-Espejel, G.E., Brizmer, V., *Micropitting Modelling in Rolling-Sliding Contacts: Application to Rolling Bearings*, Trib. Trans., 54, pp. 625-643, 2011.
- [6] Morales-Espejel, G.E., Gabelli, A., *The Behaviour of Indentation Marks in Rolling-Sliding Elastohydrodynamically Lubricated Contacts*, Trib. Trans. 54, pp. 589-606, 2011.
- [7] Brizmer, V., Pasaribu, H.R., Morales-Espejel, G.E., *Micropitting Performance of Oil Additives in Lubricated Rolling Contacts*, Trib. Trans., 56, pp. 739-748, 2013.
- [8] Morales-Espejel, G.E., Gabelli, A., *The Progression of Surface Rolling Contact Fatigue Damage of Rolling Bearings with Artificial Dents*, Trib. Trans. 58, pp. 418-431, 2015.
- [9] Morales-Espejel, G.E., Gabelli, A., de Vries, A., *A Model for Rolling Bearing Life with Surface and Subsurface Survival – Tribological Effects*, Tribology Transactions, Volume 58, Issue 5, 2015.
- [10] Lundberg, G., Palmgren, A., *Dynamic Capacity of Rolling Bearings*, Acta Polytechnica, Mec. Eng. Ser., 1(3), pp. 1-52, 1947.
- [11] Gabelli, A., Doyer, A-L, Morales-Espejel, G.E., *The Modified Life Rating of Rolling Bearings – A Criterion for Gearbox Design and Reliability Optimization*, AGMA Technical paper 14FTM16, ISBN: 978-1-61481-108-4, 2014.
- [12] Blachère, S. and Gabelli, A. *Monte Carlo Comparison of Weibull Two and Three Parameters in the Context of the Statistical Analysis of Rolling Bearings Fatigue Testing*, STP 1548, J. Beswick, Ed., pp. 126, STP104519, ASTM Int., West Conshohocken, PA 2012.
- [13] Weibull, W., *A Statistical Theory of Strength of Materials*, IVA Handlingar No. 151, Proc. Roy. Swed. Acad. of Eng. Sci., pp. 1-45, 1939.
- [14] Ioannides, E., Harris, T.A., *A New Life Model for Rolling Bearings*, ASME, J. of Trib., vol. 107, pp. 367-378, 1985.