

# TEKNOLOGI

8-sidig  
fokus-  
artikel

På Hannover-mässan i april 2015 presenterade SKFs VD och koncernchef Arik Danielson företagets nya innovativa beräkningsmodell för lagerlivslängd som utvecklats inom ramen för EnCompass Field Performance Programme.



## Ett viktigt framsteg inom livslängdsmodellering

Under den senaste Hannovermässan (i april 2015) presenterade Arik Danielson, SKFs VD och koncernchef, samt Bernd Stephan, VVD för koncernens teknikutveckling, SKF Generalized Bearing Life Model (GBLM). Det är en ny och innovativ beräkningsmodell för lagerlivslängd som ska hjälpa ingenjörer att beräkna lagernominella livslängd på ett mer realistiskt sätt. Den nya modellen är ett stort steg framåt för branschen och kommer att göra det avsevärt enklare för OEM-tillverkare och slutanvändare att välja rätt lager till olika applikationer – med ökad maskinlivslängd och minskade driftkostnader som resultat.

**DEN NYA** beräkningsmodellen har utvecklats inom ramen för SKF-programmet EnCompass Field Performance. Den baseras på styrkan i den nuvarande lagerlivslängdsmodellen – som SKF utvecklade för över 30 år sedan – men separerar effektivt felmekanismer vid ytan från dem under ytan. Genom att beakta fler parametrar ger modellen nya insikter i beräkningen av nominell lagerlivslängd.

Konceptlanseringen på Hannovermässan bestod av två live-intervjuer med GBLM-expert per dag, demonstration av beräkningsmetoden med hjälp av särskild programvara och enskilda möten med kunder och journalister. Konceptmodellen fick ett mycket positivt mottagande av publik och kunder och skapade nytt intresse för livslängdsberäkning av lager.

På följande sidor presenteras grunderna för den nya modellen. →

# SKF Generalized Bearing Life Model – styrkan i tribologin

**HITTILLS HAR** uppskattningen av rullningslagers livslängd utgått från modeller som beaktar en ekvivalent påkänning med ursprung under kontaktytan för den belastade volymen i rullkontakten. Under åren har modellen utvidgats med ytinitierade utmattningsskador från utarmad smörjning eller från föroreningar. Sådana aspekter har införts i beräkningarna i form av multiplikationsfaktorer för den totala ekvivalenta spänningen i rullkontakten. I SKF GBLM hanteras problemet genom att man utvecklar ett allmänt angreppssätt på livslängden hos rullkontakten, där ytinitierade skador uttryckligen formuleras i de grundläggande utmattningsekvationerna för rullkontakten. Denna nya formulering ger bättre möjligheter att representera tribologin hos rullningslager i livslängdsberäkningar. Vidare ger den bättre kunskap om ytors uthållighet, en faktor som är avgörande för rullningslagers prestanda i fält. Diskussion pågår om denna allmänna metods förmåga att representera tribologi och utmattningsmekanismer både vid och under ytan i rullningslager.

**MODERNA RULLNINGSLAGER** har blivit allt mer tillförlitliga, förutsatt korrekt användning och smörjning. Detta beror på god praxis liksom ökande förståelse för och tillämpning av traditionella utmattningsmekanismer i rullkontakter. Renare

material och god tillverkningskvalitet i kombination med tillförlitliga metoder för livslängdsberäkning har gjort detta möjligt. Men industrins tendens att minska dimensioner och öka produkters effekttäthet i fält ställer nya stränga krav på rullningslager i allmänhet och på deras rullkontaktytor i synnerhet. Det är därför de flesta lagerhaverier är relaterade till ytinitierade skador [1].

För att rullningslager inte ska behöva vara en flaskhals i utvecklingen mot högre prestanda hos moderna maskiner måste lagerytornas tribologi i förhållande till lagrets prestanda kunna bedömas bättre. Under det senaste decenniet har SKF gjort stora framsteg i modellering av ytors livslängd [2-8]. Tack vare SKF Generalized Bearing Life Model (GBLM) som separerar lagerytor från området under respektive yta har det blivit möjligt att integrera dessa rön i livslängdsberäkning av rullningslager [9]. Med metoden kan olika fysikaliska modeller användas för de båda regionerna. Utmattning av material under rullkontaktytor kan behandlas på vanligt sätt enligt den klassiska modellen med dynamiskt bärighetstal som utvecklades av Lundberg och Palmgren [10]. Beräkning av ytans livslängd kräver däremot avancerade tribologiska modeller som kan ta hand om de komplexa fysiska interaktioner som förekommer i högt belastade kon-

centerade Hertziska kontakter, till exempel smörjning, friktion, förslitning, utmattning och inkörning.

Detta gör det möjligt för SKF att i sina lagerlivslängdsberäkningar hantera kundanpassade konstruktioner med särskilda egenskaper som kan påverka lagrets prestanda i fält. Exempel är lager som har fått särskild värmebehandling, som har avancerad mikrogeometri eller som har getts en särskild konstruktion eller egenskap.

Kunderna kommer att kunna dra nytta av de specifika egenskaperna hos olika lager i SKF:s sortiment och ta in dessa i sina livslängdsberäkningar. Sammantaget kommer kunderna bättre att kunna utnyttja funktioner och egenskaper hos SKF-produkter som inte enkelt kan representeras av enbart det dynamiska bärighetstalet för materialet under ytan (C), den storhet som används i dag [11].

Den nya metodens förmåga att specifikt studera nedbrytningsmekanismer och tribologi på löpbanans yta gör det möjligt att använda en mer avancerad version av GBLM i utvecklingen av lagerprodukter.

SKF:s ingenjörer kommer att använda GBLM för att ta fram förbättrade lagerkonstruktioner, avsedda för speciella applikationer eller särskilda fältförhållanden. Kort sagt, GBLM är ett modernt och flexibelt verktyg för beräkning av

lagerlivslängd, som gör det möjligt att ta hänsyn till ny kunskap och ny teknik efter hand som utvecklingen går vidare.

### Generaliserad modellering

Den nuvarande modellen kommer att behålla den standardiserade sannolikhetsmetod som använts hittills för beräkning av rullningslagers livslängd. Den modellen baseras på en weibullfördelning med två parametrar, vilket diskuteras i [12]. Waloddi Weibull [13] införde, i och med teorin om den svagaste länken, stokastiska begrepp i beräkning av hållfasthet och brottgränser för konstruktionselement.

Anta att en struktur är sammansatt av  $n$  element som utsätts för olika spänningstillstånd, och följaktligen för olika sannolikhet för överlevnad  $S_1, S_2, \dots, S_n$  i enlighet med multiplikationslagen för tillförlitlighet. Då är sannolikheten för att hela strukturen överlever den som uttrycks i ekvation (1).

I sin klassiska ursprungliga formulering av det dynamiska bärighetstalet hos rullningslager [10] tillämpade Lundberg och Palmgren Weibulls multiplikationslag för tillförlitligheter, ekvation (1), för att härleda överlevnadsfunktionen hos en struktur bestående av  $n$  oberoende fysiska element som representerar nedbrytningsprocessen från 0 till  $N$  belastningscykler, se ekvation (2).

Volymen  $V$  kan delas upp i två eller flera oberoende källor till skaderisk för strukturen. Observera att  $G$  är en materialnedbrytningsfunktion som representerar den samlade verkan av ackumulerade belastningscykler (utmattning). Därför kan olika materialregioner kännetecknas av olika materialnedbrytningsfunktioner, vilka i sin tur kan beskriva olika (eller en enda) nedbrytningsprocess  $G_{v,1}, G_{v,2}, \dots, G_{v,n}$ . Deras kombinerade inverkan på

överlevnaden hos den kompletta strukturen kan uttryckas med hjälp av ekvation (2). Men beakta nu bara två regioner, en för volymen under ytan (region  $v$ ) och en annan för ytan (region  $s$ ). Härav kan följande härledas, se ekvation (3).

Enligt referens [14] kan volymintegralen för utmattningsskador erhållas med hjälp av spänningsamplituden  $\sigma_v$  från det Hertziska spänningsfältet, se ekvation (4).

Här är  $c$  och  $h$  exponenter,  $e$

→

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

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

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

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

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

representerar weibullkurvan för volymen under ytan,  $N$  är kontaktlivslängden i antal belastningscykler,  $z$  representerar analysdjupet.  $V_v$  är integrationsvolymen,  $\sigma_{u,v}$  är utmattningsgränsen vid volymen och  $\bar{A}$  är en definierad konstant.

På liknande sätt kan man skriva om funktionen för ytskador. Om konstanten  $\hat{h}$  inkluderas i proportionalitetskonstanten  $\bar{B}$ , erhåller man ekvation (5).

Här är  $m$  weibullkurvan för ytan,  $A$  är integrationsytan,  $\sigma_{u,s}$  är utmattningsgränsen vid ytan och  $\bar{B}$  är en definierad konstant.

I ytskadefunktionen (5) måste spänningen vid ytan  $\sigma_s$  erhållas från den faktiska ytgeometrin för kontakt- och friktionsspänningarna.

Genom att kombinera ekvationerna (4) och (5) med (3) erhåller vi en kontaktlivslängdsekvation med separata termer för ytan och volymen under ytan. Observera att livslängden i miljoner varv kan relateras till antalet belastningscykler via  $L = Nu$ , där  $u$  är antalet belastningscykler per varv. Baserat på att de två weibullkurvorna är mycket lika,  $e = m$ , så som är fallet med de relevanta ytfelsmekanismerna i lager, får vi slutligen ekvation (6).

Detta utgör grunden till en lagerlivslängdsmodell som uttryckligen

separerar ytan från volymen under ytan. Termen under ytan, representerad av volymintegralen, kan lösas på samma sätt som i referens [14] med hjälp av traditionella Hertziska metoder för rullkontaktutmattning. Men yttermen, representerad av ytintegralen, erbjuder nu möjligheten att i modellen konsekvent inkludera många tribologiska fenomen som kännetecknar uthålligheten hos löpbaneytan.

I denna utveckling krävs naturligtvis avancerade numeriska modeller. Sådana krävs närmare bestämt för att representera komplexa samverkande nedbrytningsmekanismer. Exempel: i) ytutmattning i kombination med lätt förslitning, ii) utveckling av intryckningsskador, iii) tribokemiska interaktioner, och många andra. En schematisk bild av huvudprincipen för GBLM visas i fig. 1.

### Ytmodeller

En numerisk ytskademodel som kombinerar utmattning med lätt förslitning beskrivs i [5]. Denna modell kräver som indata digitaliserade ytjämnhetsprofiler för kontaktytorna (fig. 2), och den löser det elastohydrodynamiska problemet med blandsmörjning (med icke-Newtonsk reologi).

Lösningen uppnås i tidssteg med beräknade tryck och spänningar. Beräkningsmodellen applicerar ett skadekriterium och en förslitningsmodell för att uppdatera yttopografin och fortsätta till nästa beräkningstidssteg, ända tills en fullständig belastningscykel för överrullning har slutförts. Denna numeriska process upprepas miljontals gånger för alla beräkningspunkter på ytan. Detta möjliggör en god simulering av de fysikaliska fenomenen kring ackumuleringsprocessen av slitage/utmattningsskador på löpbaneytan för varje givet antal överrullningar. Typiska resultat av denna numeriska modell visas i fig. 3 och jämförs med experimentella resultat från tester som utförts under samma villkor som definierats för den numeriska simuleringen.

Andra ytmodeller som kan användas och vars resultat kan integreras i GBLM är [3, 6, 7]. För tydlighetens skull visar vi endast den ytskademodel som beskrivs i [5] som exempel på flexibiliteten hos GBLM när det gäller att integrera avancerade ytskad modeller. Denna modell användes för att utföra en parametrisk studie med olika driftförhållanden, ytjämnheter från olika lagertyper och storlekar och olika smörj- och föroreningsförhållanden [9]. I denna parametriska studie normaliserades ytutmattningsintegralen och kurvan anpassades till följande funktion med hjälp av lagerparametrar, ekvation (7).

Här är  $f_p, f_y, \dots, f_s$  konstanter,  $P$  är den ekvivalenta dynamiska lagerbelastningen och  $P_u$  är utmattningsgränsen för lagret. Parametern  $R_s$  representerar en

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

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

uppskattad ytskaderisk. Den är med andra ord ett mått på de spänningar som lagrets löpytor utsätts för.

Med hjälp av den avancerade ytskademodellen kan olika smörj- och föroreningsförhållanden i lagret beräknas och deras inverkan på överlevnadssannolikheten för ytan kan härledas. Genom att införa parametern  $\eta = \eta_b \eta_c$  [3] (för att indikera den högre eller lägre risken för ytsamverkan) kan vi alltså erhålla en representation av ekvation (7) som funktion av den dimensionslösa ekvivalenta belastningen  $P_u/P$  för en viss lagertyp, se fig. 4.

### Prestandafaktorer

Med hjälp av den ovan diskuterade metoden kommer vi så småningom att kunna ta hänsyn till unika konstruktionsmässiga aspekter på SKF-lager och härleda specialframtagna "prestandafaktorer". Dessa faktorer skulle kunna utvecklas för att ge en bättre representation av inverkan av särskilda egenskaper och specifika driftförhållanden.

Vanligtvis kommer dessa prestandafaktorer att handla om ytprestanda, till exempel på grund av nya värmebehandlingar, material som ger ökad hårdhet i löpbanorna, beläggningar, förbättrad mikrogeometri i löpbanorna eller ytbehandling. Men särskilda prestandafaktorer kan i framtiden även komma att omfatta volymen under ytan och dessutom vissa aspekter på smörjmedel och smörjning. Strukturen hos GBLM gör det möjligt att på ett konsekvent sätt införliva ny lagerteknik och relaterad kunskap om prestandaförsägelser efter hand som utvecklingen fortskrider. →

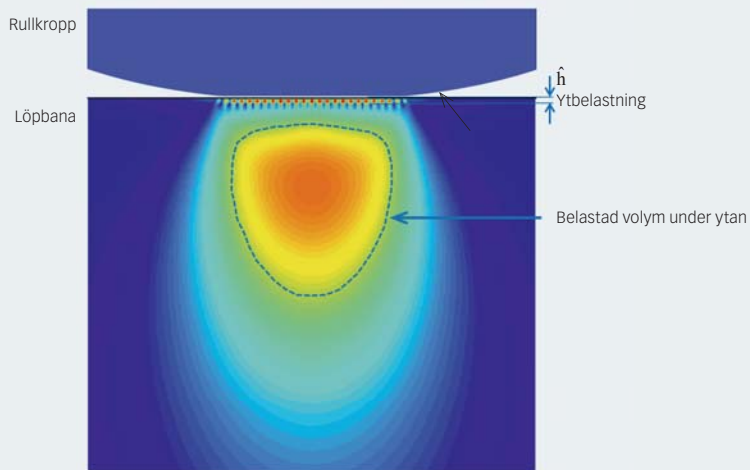


Fig. 1: Separation av yta och volym under ytan i enlighet med GBLM.

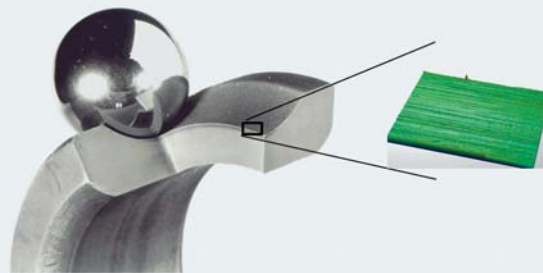
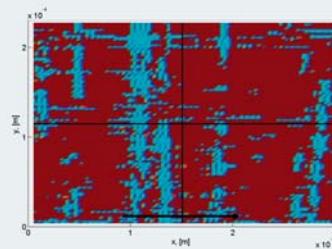


Fig. 2: Digitalisering av ytprofilen i en löpband med hjälp av en optisk profilometer för ytmappning i 3D



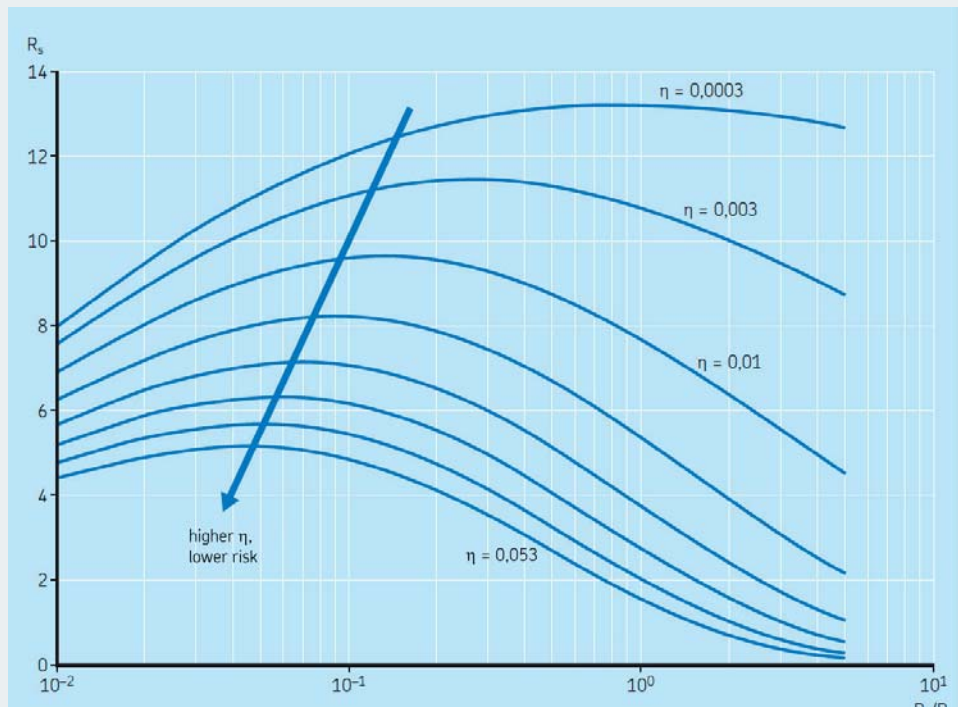
(a) Modellerresultat



(b) Experiment

Fig. 3: Typiska resultat från långt framskriden ytmattning enligt [5].

Fig. 4: Exempel på ytskaderisk som funktion av belastning och smörjnings-/föroreningsförhållanden.



Som ett exempel på en prestandafaktor relaterad till överlevnadssannolikheten hos löpbanans yta, kan man tänka sig att införa löpbanor med ökad hårdhet, det vill säga ökad motståndskraft mot slitage och föroreningar, särskilt under utarmade smörjförhållanden. Kunskapen om förväntad högre uthållighet hos ytan kan vara en faktor i ekvationen (7), med hjälp av en prestandafaktor som minskar ytskaderisken, så som visas i fig. 5.

Observera att i detta särskilda fall har prestandafaktorn utvecklats bara med avseende på en viss del av lagrets driftförhållanden. Så som framgår av fig. 5 sker den tydligaste minskningen av ytskaderisk i området med stor risk för ytskador. När parametern  $\eta$  ökar och risken min-

skar så minskar även inverkan av prestandafaktorn. Detta visar förmågan hos denna GBLM-prestandafaktor att särskilt rikta in sig mot förhållanden med utarmad smörjning eller kraftig förorening, där risken för ytskador kan förväntas öka mest.

### Normaliserad ytskaderisk

Eftersom GBLM har förmågan att separera uthållighetstermerna vid och under ytan är det möjligt att vikta deras relativa inverkan på lagrets totala dynamiska prestanda.

Till exempel genom att införa i) den normaliserade ytintegralen eller ytskaderisken  $R_y$ , ii) den normaliserade integralen för spänningen under ytan eller skaderisken under ytan  $R_{ss}$ , och iii) skalnings-

koefficienten  $c$ , kan man härleda den normaliserade ytskaderisken för lagret, vilken visas i ekvation (8).

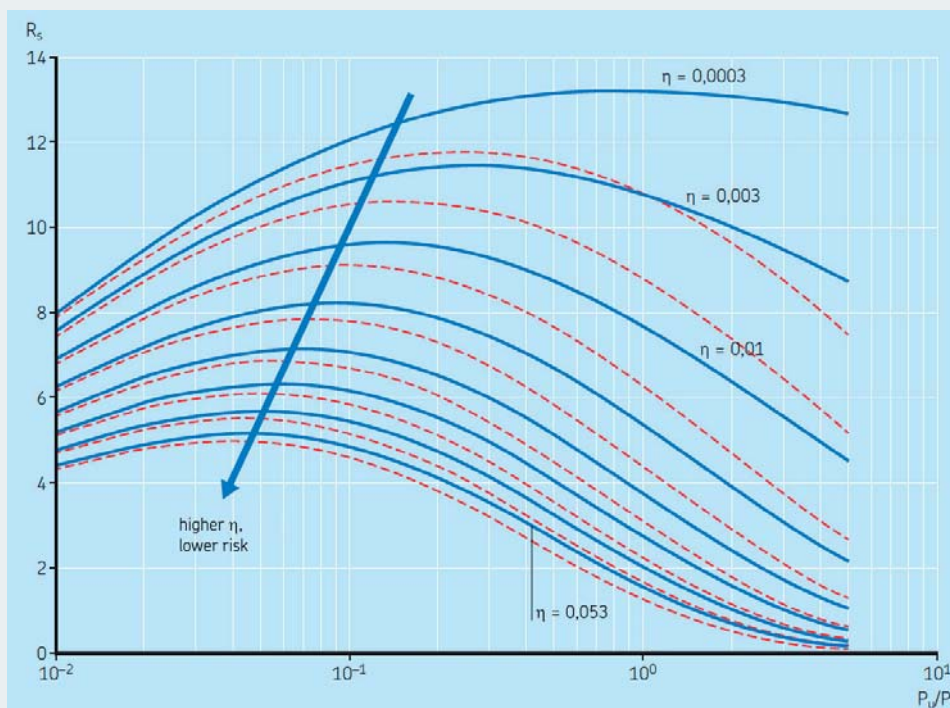
Denna parameter kan variera mellan 0 och 1. När den ligger nära 1 har utmattning vid ytan en dominerande roll i förhållande till utmattning under ytan. När den ligger nära 0 är det tvärtom. Detta är en viktig parameter för att förstå vilket spänningsområde i lagret som bär den högre risken. Med denna information kan applikationsingenjörer och kunder planera korrigerande åtgärder för att maximera lagerprestanda och pressa kostnaderna.

### Modellvalidering

När driftförhållandena är likartade ger GBLM resultat som överensstämmer med SKF:s nuvarande livslängdsteori och i stor utsträckning även med livslängdsmodellerna enligt ISO 281. Detta beror på att GBLM har validerats mot SKF:s omfattande databas över uthållighetstestresultat. Denna databas utökas och uppdateras kontinuer-

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

**Fig 5: Exempel på ytskaderisk som funktion av belastning och smörjnings-/föroreningsförhållanden. De röda streckade linjerna visar inverkan av en prestandafaktor som beskriver införandet av en värmebehandling som ger en hårdare löpbaneyta.**



ligt för att ligga i takt med lagerteknikens utveckling.

Införandet av prestandafaktorer kommer så småningom att påverka förväntad livslängd. Detta är dock en följd av prestandaförändringar som införts genom förbättrad lagerkonstruktion, vilka nu blir synliga i värdena för nominell livslängd. I samtliga fall säkerställer SKF att lagerprestandaförändringar stöds av korrekt utförda uthållighetstester.

### Kundnytta med GBLM

Kunderna kan dra stor nytta av att GBLM införs i bedömningen av lagerlivslängd. Beräkningen av förväntade uthållighetsprestanda hos lagret kan kompletteras just med kunskap om ytskaderisken hos applikationen. Om lagerinbyggnaden är sådan att ytskaderisken överväger kan korrigerande åtgärder vidtas och åtgärdernas inverkan på sannolikheten för ytöverlevnad kvantifieras. Med andra ord kan GBLM fungera som ett diagnos-

verktyg för att förbättra lagrets prestanda i fält genom att reducera haverier som beror på ytskador.

I allmänhet kan hög risk för ytskador på grund av utarmade smörjförhållanden och ökad föroreningsgrad inte lösas genom val av större lager med högre dynamiskt bärighetstal. Detta går snabbt att kontrollera via inverkan på den normaliserade ytrisken av det ökade bärighetstalet och den större dimensionen. Kunden kan alltså dra nytta av GBLM genom att kunna göra ett mer kvalificerat val av lager, anslutande komponenter och smörjsystem för att maximera prestanda och reducera den totala kostnaden för applikationen.

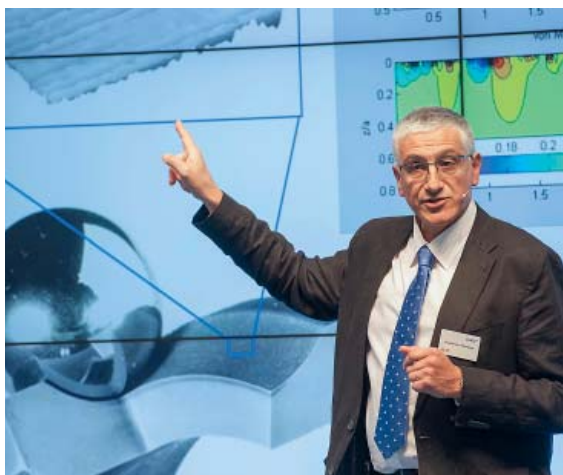
### Sammanfattning och slutsatser

SKF Generalized Bearing Life Model, GBLM, erbjuder ett mer flexibelt sätt att uttrycka lagerlivslängd då den uttryckligen separerar termerna relaterade till ytfelsmekanismer från dem relaterade till

rullkontaktutmattnings under ytan. Denna modell introducerar begreppet prestandafaktorer, och gör det möjligt att inrikta analysen på särskilda lageregenskaper och specialanpassade konstruktioner eller applikationer. Förutom att uppskatta nominell livslängd hos lager, beräknar modellen även ett normaliserat ytriskvärde  $S_R$ , för att ge en tydlig indikation av viktighetsförhållandet mellan ytutmattnings och utmattnings under ytan.

Generellt kan följande slutsatser nämnas:

1. SKF Generalized Bearing Life Model är en ny modell som tillåter tydlig uppdelning mellan termer som påverkar ytan och termer som påverkar volymen under ytan. Den kan ses som ett mer flexibelt sätt att uttrycka SKFs nuvarande livslängdsteori.
2. Den är den enda lagerlivslängdsmodellen i branschen som uttryckligen innehåller separata termer för ytan och volymen under →



På Hannovermässan i april 2015 presenterade Guillermo E. Morales-Espejel SKF Generalized Bearing Life Model.

ytan. Detta gör det enkelt att tillämpa nya kunskaper som vunnits med hjälp av avancerade numeriska tribologimodeller.

3. Nya inslag i modellen är prestandafaktorer som används för att representera SKFs egna konstruktionsförbättringar i lagret och/eller konstruktionsmässiga aspekter som påverkar prestanda hos lagret under specifika driftförhållanden som undersöks.
4. GBLM kan ses som en plattform med ett antal olika modeller, som kan utökas efter hand som ny kunskap utvecklas. Detta gör det enkelt att ta hänsyn till diverse fenomen som specifikt påverkar antingen ytan eller volymen under ytan i lager.
5. SKF Generalized Bearing Life Model kommer att bli tillgänglig för företagets kunder inom en snar framtid. ●

#### Författare:

**Guillermo E. Morales-Espejel**, chefsforskare, SKF Engineering & Research Centre, Nieuwegein, Nederländerna

**Antonio Gabelli**, senior forskare, SKF Engineering & Research Centre, Nieuwegein, Nederländerna

#### Referenser

- [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.