

Alrik Danielson, PDG du Groupe SKF, présentant le SKF EnCompass Field Performance Programme et le SKF Generalized Bearing Life Model à la Foire de Hanovre en avril 2015.



Un nouveau modèle – une avancée majeure

Dans le cadre de la récente Foire de Hanovre (avril 2015), Alrik Danielson, Président-directeur général du Groupe SKF, et Bernd Stephan, Vice-président directeur, Développement technologie du Groupe, ont annoncé l'introduction du SKF Generalized Bearing Life Model (GBLM) ou le Modèle général de la durée du roulement, un nouveau modèle innovant, élaboré pour aider les ingénieurs à calculer la durée nominale des roulements d'une manière plus réaliste. Ce nouveau modèle, qui constitue une avancée majeure pour le secteur, est appelé à jouer un rôle important, en permettant aux constructeurs comme aux utilisateurs finaux d'optimiser l'adéquation entre roulements et applications et d'allonger ainsi la durée de service des machines, tout en réduisant les coûts d'exploitation.

DÉVELOPPÉ DANS LE CADRE du SKF EnCompass Field Performance Programme, ce nouveau modèle exploite les points forts du modèle actuel de durée nominale des roulements, mis au point par SKF voici plus de 30 ans, en parvenant à distinguer entre les modes de défaillance en surface et les modes de défaillance en sous-couche. Englobant un plus grand nombre de paramètres, il apporte une nouvelle dimension au calcul de la durée nominale des roulements.

Pour le lancement du concept sur la Foire de Hanovre, des interventions d'experts du GBLM et des démonstrations de la méthode de calcul au moyen de logiciels ont été organisés sur deux jours. Le modèle a reçu un accueil très favorable du public et des clients et ravivé l'intérêt pour l'estimation de la durée nominale des roulements.

Présentation des notions relatives à ce nouveau modèle. →

SKF Generalized Bearing Life Model ou la puissance de la tribologie

JUSQU'À PRÉSENT, l'estimation de la durée des roulements reposait sur des modèles d'ingénierie basés sur une contrainte équivalente, induite sous la surface de contact, appliquée au volume de contraintes du contact de roulement. Au fil des années, la fatigue initiée en surface, par une lubrification médiocre ou la contamination notamment, a été intégrée au calcul de la durée nominale des roulements par le biais d'une pénalité appliquée à la contrainte équivalente globale du contact de roulement. Le SKF GBLM traite ce problème grâce à une approche générale de la durée du contact de roulement qui consiste à représenter explicitement l'altération de surface dans les équations de fatigue de base des contacts de roulement. Cette nouvelle formulation permet une meilleure prise en compte de la tribologie des roulements dans les calculs de durée nominale. De plus, elle permet de mieux connaître la résistance de la surface qui joue un rôle prépondérant dans les performances du roulement sur le terrain. Il sera question de la capacité de la méthode générale actuelle à prendre en compte les mécanismes de tribologie et de fatigue en surface/fatigue en sous-couche en présence dans les roulements.

CORRECTEMENT UTILISÉS et lubrifiés, les roulements modernes sont de plus en plus fiables. Ces progrès s'expliquent par la mise en œuvre de bonnes pratiques et par une bonne connaissance

et exploitation des mécanismes classiques de fatigue des contacts de roulement. L'amélioration de la propreté des matériaux et de la qualité de fabrication, combinée à des méthodes de calcul de durée fiables, ont permis ces progrès. Cependant, les tendances du secteur à la réduction de l'encombrement et à l'augmentation des rendements continuent de soumettre les roulements, et en particulier les surfaces de contact, à des conditions toujours plus sévères ; ce qui explique que la plupart des défaillances de roulements soient liées à la surface [1]. Pour éviter que les roulements ne deviennent un obstacle à de nouvelles améliorations des performances des machines modernes, une meilleure prise en compte de la tribologie des surfaces de roulement par rapport aux performances des roulements est nécessaire. Au cours de la dernière décennie, SKF a réalisé des progrès importants dans le domaine de la modélisation de la durée des surfaces [2-8]. L'intégration de ces connaissances dans le calcul de la durée des roulements s'est finalement concrétisée [9] avec l'introduction du SKF Generalized Bearing Life Model (GBLM), qui fait la distinction entre surface et sous-couche, de sorte que des modèles physiques différents peuvent être appliqués à ces deux zones. La fatigue en sous-couche du contact de roulement peut être traitée selon la méthode habituelle en appliquant le modèle classique de

capacité dynamique développé par Lundberg et Palmgren [10], tandis que le traitement des phénomènes en surface nécessite des modèles tribologiques plus sophistiqués qui tiennent compte des interactions physiques complexes qui s'opèrent dans les contacts hertziens à forte concentration de contraintes : la lubrification, le frottement, l'usure, la fatigue ou le rodage.

Cela permet à SKF, dans ses prédictions de durée nominale, de mieux refléter les conceptions plus personnalisées présentant des caractéristiques spécifiques susceptibles d'influer sur les performances des roulements sur le terrain. Citons par exemple les roulements soumis à un traitement thermique spécifique ou qui présentent une micro-géométrie améliorée ou encore une conception ou qualité particulière.

Les clients pourront bénéficier des différentes caractéristiques exclusives des roulements SKF présentées dans le catalogue produits et les intégrer dans leurs calculs de durée nominale. À terme, les clients seront en mesure de mieux exploiter les caractéristiques et la qualité des produits SKF qui ne peuvent être représentées de manière satisfaisante par une unique charge dynamique « de base » (C) comme cela se pratique actuellement [11].

La possibilité offerte par cette nouvelle approche de traiter spécifiquement les mécanismes de dégradation et la tribologie de la surface des pistes permettra

d'utiliser la version plus aboutie du GBLM pour le développement de roulements.

Les ingénieurs SKF utiliseront le GBLM pour développer des roulements de conception améliorée destinés à des applications spéciales ou à des exigences de performances sur le terrain particulières. En somme, le GBLM constitue un outil moderne et flexible d'évaluation des performances des roulements pouvant intégrer de nouvelles connaissances et technologies au fil de leur développement.

Démarche de modélisation généralisée

Le modèle actuel conserve la démarche probabiliste normalisée utilisée jusqu'ici dans les calculs de durée nominale des roulements et qui repose sur une distribution de Weibull à deux paramètres, comme expliqué dans la référence [12]. Waloddi Weibull [13], avec sa théorie du maillon le plus faible, a introduit des notions stochastiques dans la détermination de la résistance à la rupture d'éléments structurels.

Pour une structure constituée de n éléments soumis à différents états de contraintes et présentant par conséquent des probabilités de survie S_1, S_2, \dots, S_n différentes d'après la loi de fiabilité, la probabilité de survie de la structure globale est donnée par l'équation (1).

Lundberg et Palmgren, dans leur formule classique de la charge dynamique de base des roulements [10], ont appliqué la loi de fiabilité de Weibull, correspondant à l'équation (1), pour déterminer la fonction de survie d'une structure constituée de n éléments physiques indépendants tenant compte du processus de dégradation qui s'opère de 0 à N cycles de charge : équation (2).

Le volume V peut être divisé en plusieurs sources indépendantes de risques de dommages

pour la structure, G représentant une fonction de la dégradation du matériau tenant compte de l'effet de l'accumulation des cycles de charge (fatigue). Ainsi, différentes régions peuvent être caractérisées par différentes fonctions de dégradation du matériau décrivant différents (ou un seul) processus de dégradation $G_{v,1}, G_{v,2}, \dots, G_{v,n}$. Leur effet combiné sur la survie de la structure complète peut être exprimé à l'aide de l'équation (2). Maintenant, si l'on considère uniquement deux régions, l'une correspondant à la sous-couche (région v) et l'autre, à la surface (région s), on aboutit à l'équation (3).

D'après la référence [14], l'intégrale du volume d'altération de surface peut être obtenue à partir de l'amplitude de contrainte σ_v correspondant au champ de contraintes hertzien : équation (4).

Dans cette équation, c et h sont des exposants, e représente la pente de la courbe de Weibull pour

la région en sous-couche, N est la durée du contact en nombre de cycles de charge, z représente la profondeur d'analyse, V_v correspond au volume d'intégration et $\sigma_{u,v}$, à la limite de fatigue pour ce volume, et \bar{A} est une constante de normalisation.

La fonction de l'altération de surface peut être réécrite de la même manière. Si la constante \hat{h} est comprise dans la constante de proportionnalité de l'altération de surface \bar{B} , on obtient : équation (5).

Dans cette équation, m représente la pente de la courbe de Weibull pour la surface, A correspond à la surface d'intégration, $\sigma_{u,s}$, à la limite de fatigue pour cette surface et \bar{B} est une constante de normalisation.

Dans la fonction de l'altération de surface (5), les contraintes en surface σ_s doivent être déterminées à partir de la géométrie de surface réelle du contact et des contraintes de frottement.

Maintenant, en combinant les \rightarrow

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

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

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

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

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

équations (4) et (5) avec la (3), on obtient une équation de durée du contact avec des termes séparés pour la surface et la sous-couche. Il est à noter que la durée de service en nombre de tours peut être reliée au nombre de cycles de charge par $L = N/u$ où u est le nombre de cycles de charge par tour et en considérant que les deux pentes des courbes de Weibull sont très similaires, autrement dit que $e = m$, ce qui est le cas des modes de défaillance en surface pertinents pour les roulements, ce qui nous conduit à : équation (6).

C'est là la base d'un modèle de durée des roulements qui fait clairement la distinction entre surface et sous-couche. La partie correspondant à la sous-couche, représentée par l'intégrale du volume, peut être résolue de la même manière que dans la référence [14], en utilisant les techniques classiques relatives à la fatigue des contacts de roulement hertziens. Cependant, le terme de la surface, représenté par l'intégrale de l'aire, offre désormais la possibilité d'intégrer constamment dans le modèle de nombreux phénomènes tribologiques liés à la résistance de la surface des pistes.

Bien sûr, ce développement passe nécessairement par des modèles numériques pointus. En effet, il est nécessaire de représenter les interactions complexes des mécanismes de dégradation en concurrence. Par exemple : i) fatigue en surface combinée à une usure douce, ii) évolution de la détérioration par indentation, iii) interactions tribochimiques, et bien d'autres. Le

concept de base du GBLM est représenté schématiquement sur la Fig. 1.

Modèles de surface

Un modèle numérique d'altération de la surface qui combine fatigue et usure douce est décrit dans la référence [5] ; ce modèle, qui nécessite comme données d'entrée des cartes numériques de rugosité des surfaces de contact (Fig. 2), résout le problème de la lubrification mixte élastohydrodynamique (rhéologie non newtonienne).

Le calcul est réalisé par étapes sur la base des pressions et contraintes calculées. Le modèle de calcul applique un critère d'altération et un modèle d'usure pour actualiser la topographie de la surface et passer à l'étape suivante de calcul jusqu'à ce qu'un cycle complet de charge en roulement ait été effectué. Ce processus numérique est répété des millions de fois pour tous les points de calcul sur la surface. On obtient ainsi une simulation satisfaisante des phénomènes physiques du processus d'accumulation de l'usure/dommages par fatigue sur la surface des pistes pour un nombre de tours donné. Les résultats typiques fournis par ce modèle de calcul sont illustrés par la Fig. 3 sur laquelle ils sont comparés aux résultats expérimentaux tirés d'essais réalisés dans des conditions identiques à celles utilisées pour la simulation numérique.

Les [3, 6, 7] sont d'autres modèles de surface qui peuvent être utilisés et fournir des résultats à intégrer dans le GBLM. Pour illustrer la flexibilité du GBLM, auquel il est possible d'intégrer des

modèles d'altération de surface avancés, on s'intéressera uniquement, et ce dans un souci de clarté, au modèle d'altération de surface décrit dans la référence [5]. Ce modèle a été utilisé dans le cadre d'une étude paramétrique basée sur différentes conditions de service, la rugosité de roulements de différents types et dimensions, et différents régimes de lubrification et niveaux de contamination [9]. Cette étude paramétrique a permis de normaliser l'intégrale de la fatigue en surface et d'ajuster sa courbe à la fonction suivante basée sur les paramètres des roulements : équation (7).

Ici f_1, f_2, \dots, f_5 sont des constantes, P correspond à la charge dynamique équivalente et P_u à la limite de fatigue du roulement. Le paramètre R_s représente le risque théorique de dommages de la surface, autrement dit, une mesure des contraintes qui s'exercent sur les surfaces de roulement.

L'utilisation du modèle d'altération de surface avancé permet de tenir compte des différentes conditions de lubrification et contamination du roulement et de déterminer leurs effets sur la probabilité de survie de la surface. De cette manière, en introduisant le paramètre $\eta = \eta_b \eta_c$ [3] (pour indiquer le risque plus ou moins élevé d'interaction de surface), on obtient une représentation de l'équation (7) en fonction de la charge équivalente non dimensionnelle P_u/P pour un type de roulement donné, voir Fig. 4.

Facteurs de performances

Les caractéristiques de conception uniques des roulements SKF peuvent finalement être prises en compte en utilisant la méthodologie présentée ci-dessus pour déterminer des « facteurs de performances » spécialement élaborés. Ces facteurs peuvent être développés afin de mieux tenir compte des performances liées

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

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

à certaines caractéristiques de conception et à des conditions de service spécifiques.

Ces facteurs de performances s'appliquent généralement aux performances de la surface résultant par exemple de traitements thermiques ou matériaux novateurs visant à améliorer la dureté des pistes, de l'application d'un revêtement, de l'introduction d'une microgéométrie améliorée des pistes ou encore d'un fini de surface de qualité supérieure. Cependant, l'utilisation de facteurs de performances spécifiques pourrait à l'avenir s'étendre également à la zone en sous-couche, voire à des aspects particuliers relatifs aux lubrifiants ou à la lubrification. En fait, la structure du GBLM permet d'intégrer en continu de nouvelles technologies et connaissances relatives aux roulements et à leurs performances à mesure qu'elles apparaissent.

En guise d'exemple de facteur de performance lié à la probabilité de survie de la surface des pistes, nous nous intéresserons à l'introduction de pistes de dureté supérieure, autrement dit offrant une meilleure résistance à l'usure et à la contamination, notamment sous un régime de lubrification maigre. La connaissance des performances supérieures escomptées concernant la résistance de la surface peut être intégrée à l'équation (7), en utilisant un facteur de performance qui réduit la valeur du risque de dommages en surface comme illustré à la Fig. 5.

Il convient de noter que, dans ce cas particulier, le facteur de performance a été développé pour cibler uniquement une partie des conditions de service du roulement. Comme on le voit sur la Fig. 5, la réduction la plus significative du risque de dommages en surface coïncide avec la zone de risque élevé pour la surface ; étant donné que le paramètre η augmente et que le risque diminue, l'influence

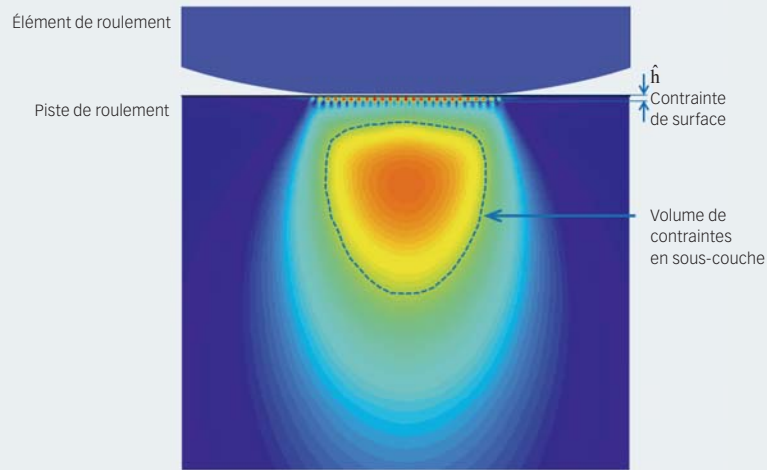


Fig. 1 : séparation de la surface et de la sous-couche telle que proposée par le GBLM.

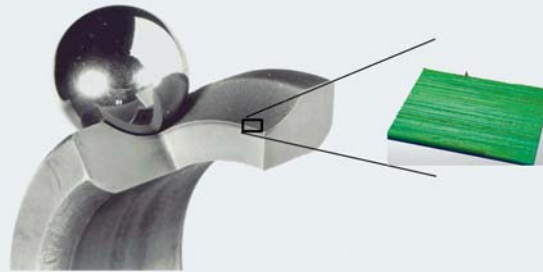
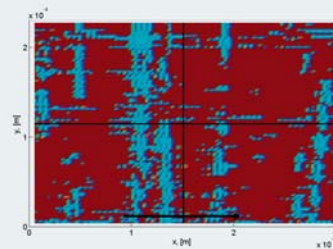


Fig. 2 : numérisation de l'état de surface des pistes de roulement en utilisant un profilomètre optique pour obtenir une cartographie 3D de la surface.



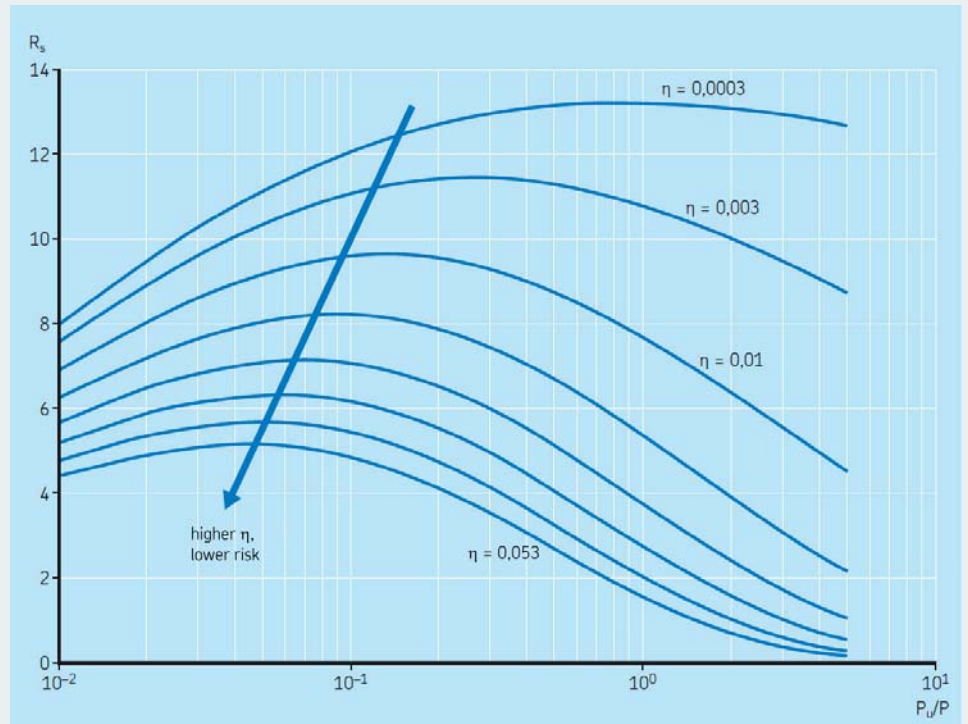
(a) Résultats fournis par le modèle



(b) Expérience

Fig. 3 : résultats typiques de l'altération de surface avancée décrite dans la référence [5].

Fig. 4 : exemple d'évaluation du risque pour la surface en fonction de la charge et des conditions de lubrification/contamination.



du facteur de performance est également réduite. Cet exemple illustre parfaitement la capacité du facteur de performance du GBLM à cibler spécifiquement, parmi les conditions de service du roulement, des conditions de lubrification médiocre ou de forte contamination qui sont les conditions dans lesquelles la réduction la plus significative du risque pour la survie de la surface est attendue.

Risque en surface normalisé

Étant donné que le GBLM est capable de séparer les termes relatifs à la résistance de la surface et à celle de la sous-couche, il est possible d'évaluer l'impact de chacun sur la performance dynamique globale du roulement.

Par exemple, en introduisant : i)

l'intégrale normalisée de la surface ou le risque de dommages en surface R_s , ii) l'intégrale normalisée des contraintes en sous-couche ou le risque de dommages en sous-couche R_{ss} et iii) le facteur d'échelle c , on peut alors déterminer le risque en surface normalisé à partir de l'équation (8).

Ce paramètre peut varier entre 0 et 1. Lorsqu'il est proche de 1, la fatigue en surface est prédominante par rapport à la fatigue en sous-couche, et inversement lorsqu'il est proche de 0. Il s'agit d'un paramètre important pour déterminer la zone de contraintes du roulement exposée au risque le plus élevé. Grâce à ces informations, les ingénieurs d'application comme les clients peuvent envisager des mesures correctives pour optimiser les performances du

roulement et réduire les coûts.

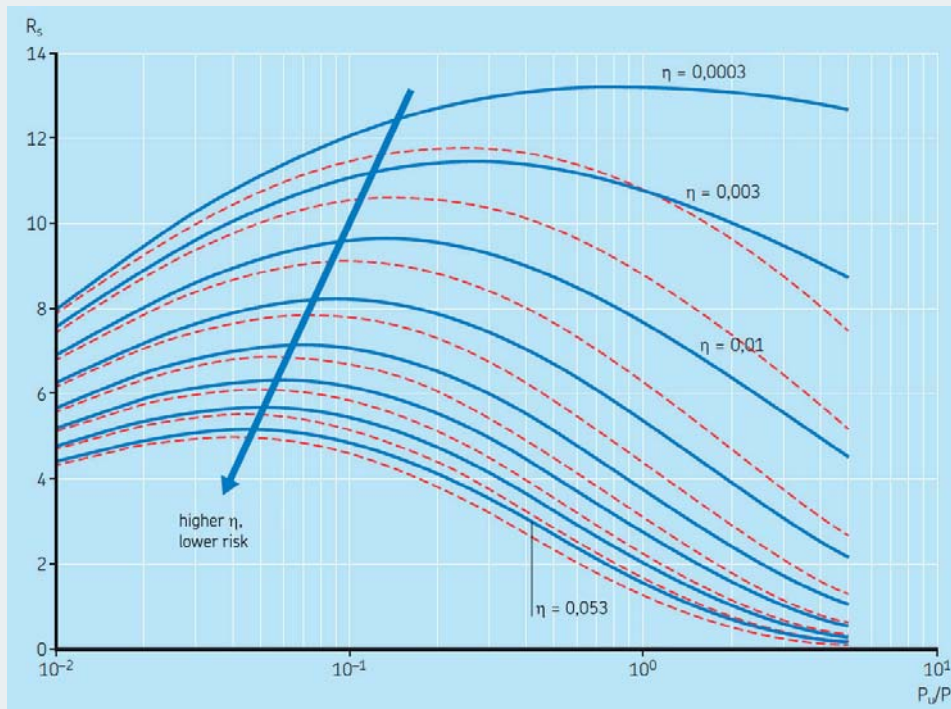
Validation du modèle

Dans des conditions de service similaires, le GBLM fournit des résultats conformes à ceux obtenus avec le modèle actuel de calcul de la durée nominale SKF ainsi que, dans une large mesure, avec les modèles de calcul de durée ISO 281. Cela vient du fait que le GBLM a été validé par rapport à la vaste base de données de résultats d'essais d'endurance établie par SKF. Cette base de données est constamment enrichie et actualisée afin de suivre les avancées de la technologie des roulements.

L'introduction de facteurs de performances est susceptible de modifier la prévision de durée. Il s'agit d'une conséquence des modifications de performances permises par les nouvelles caractéristiques de conception des roulements, lesquelles transparaissent désormais dans la durée de vie théorique. Dans tous les cas, SKF veille à ce que les modifications de performances

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

Fig. 5 : exemple d'évaluation du risque pour la surface en fonction de la charge et des conditions de lubrification et de contamination. Les pointillés en rouge se rapportent à l'utilisation d'un facteur de performance pour tenir compte de l'introduction d'un traitement thermique destiné à améliorer la dureté de la surface des pistes.



des roulements s'appuient sur des essais d'endurance correctement réalisés.

Avantages du GBLM pour les clients

Les clients peuvent tirer des avantages significatifs de l'introduction du GBLM dans le calcul de la durée nominale des roulements. En effet, le calcul des performances d'endurance attendues du roulement sera enrichi par des connaissances sur le risque pour la surface au sein de l'application. Si les conditions d'application du roulement induisent un risque principalement pour la surface, il est possible d'évaluer l'effet sur le risque de survie de la surface de mesures correctives. En d'autres termes, le GBLM peut être utilisé comme outil de diagnostic pour améliorer les performances du roulement sur le terrain en réduisant les défaillances liées à la fatigue en surface.

En règle générale, le choix d'un roulement de dimension et de

charge dynamique supérieures ne permet pas de remédier à un risque élevé pour la surface, induit par une diminution de la qualité de lubrification et une augmentation de la contamination. Ceci peut être rapidement vérifié par l'analyse de l'effet d'une augmentation de la capacité de charge et de la dimension du roulement sur le risque en surface normalisé. Le GBLM offre ainsi aux clients la possibilité de prendre des décisions plus éclairées concernant le choix du roulement, des pièces adjacentes et du système de lubrification afin d'optimiser les performances et de réduire le coût global.

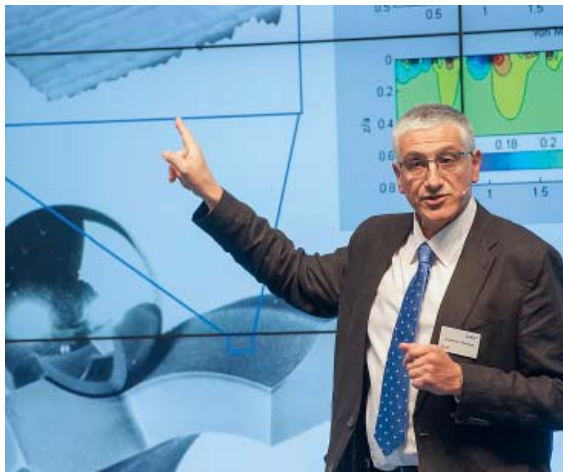
Synthèse et conclusions

Une manière plus flexible d'exprimer la durée nominale des roulements, en faisant la distinction explicite entre les termes relatifs aux modes de défaillance en surface et ceux relatifs à la fatigue en sous-couche générale du contact de roulement, a été présentée lors du lancement du SKF Generalized

Bearing Life Model (GBLM). Ce modèle, qui introduit l'utilisation de facteurs de performances, permet de cibler des caractéristiques spécifiques du roulement et des conceptions de roulements et applications personnalisées. Outre l'estimation de la durée nominale des roulements, ce modèle permet également de calculer la valeur S_R de risque en surface normalisé qui offre une indication claire du poids de la fatigue en surface par rapport à la fatigue en sous-couche.

Les conclusions générales à tirer sont les suivantes :

1. Le SKF Generalized Bearing Life Model est un nouveau modèle qui fait clairement la distinction entre les termes relatifs à la surface et ceux qui se rapportent à la sous-couche et qui représente ainsi une manière plus flexible d'exprimer la durée nominale SKF actuelle.
2. Ce modèle est le seul modèle existant de calcul de la durée des →



Guillermo E. Morales-Espejel
présentant le SKF Generalized
Bearing Life Model à la Foire de
Hanovre en avril 2015.

roulements qui contiennent des termes distincts pour la sous-couche et pour la surface dans sa formulation, ce qui permet d'intégrer facilement les connaissances acquises dans le cadre de l'utilisation de modèles tribologiques numériques de pointe.

3. Les nouveautés offertes par ce modèle consistent en l'introduction de facteurs de performances afin de tenir compte d'améliorations de conception exclusives à SKF et/ou de caractéristiques de conception influant sur les performances du roulement au sein d'une application dans les conditions de service ciblées.
4. Le GBLM peut être considéré comme une plate-forme de modèles appelée à s'étoffer au gré de l'évolution des connaissances, permettant ainsi d'intégrer facilement la prise en compte de différents phénomènes affectant spécialement la surface ou la sous-couche dans les roulements.
5. Le SKF Generalized Bearing Life Model sera mis à la disposition des clients prochainement. ●

Auteurs :

Guillermo E. Morales-Espejel,
Scientifique en chef, Centre d'ingénierie et
de recherche SKF, Nieuwegein (Pays-Bas).

Antonio Gabelli

Scientifique senior, Centre d'ingénierie et
de recherche SKF, Nieuwegein (Pays-Bas).

Références

- [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.