

Feria Hannover Messe, abril de 2015, Alrik Danielson, Presidente y CEO del Grupo SKF, presentando el SKF EnCompass Field Performance Programme e introduciendo el Modelo generalizado de cálculo de vida útil de rodamientos de SKF.



Gran avance en el cálculo de la vida útil

En la reciente feria Hannover Messe (abril de 2015), Alrik Danielson, Presidente y CEO del Grupo SKF, y Bernd Stephan, Vicepresidente sénior de Desarrollo Tecnológico, anunciaron el lanzamiento del concepto de Modelo generalizado de cálculo de vida útil de rodamientos (GBLM) de SKF, un innovador modelo diseñado para ayudar a los ingenieros a calcular de una manera más realista la vida nominal de estos componentes. Dicho modelo significa un gran avance para la industria, y desempeñará un importante papel al permitir a los fabricantes de equipos originales y usuarios finales adaptar mejor los rodamientos y las aplicaciones, lo que dará lugar a una vida útil más prolongada de la maquinaria y a una reducción de los costos operativos.

ESTE NUEVO MODELO, desarrollado como parte del SKF EnCompass Field Performance Programme, distingue acertadamente entre los modos de falla originados en la superficie y los de la subsuperficie, y se basa en los puntos fuertes del actual modelo de vida útil de los rodamientos, creado por SKF hace más de 30 años. Al abarcar más parámetros, este modelo brinda nueva información para el cálculo de la vida nominal de los rodamientos.

El lanzamiento del concepto en Hannover incluyó dos entrevistas diarias en vivo con expertos de GBLM, demostraciones del método de cálculo mediante software especial, y la interacción personal con clientes y periodistas. La acogida que recibió por parte del público y los clientes fue muy positiva, y se revitalizó el interés por calcular la vida nominal de los rodamientos. Lo presentamos a continuación. →

El Modelo generalizado de cálculo de vida útil de rodamientos de SKF, la fuerza de la tribología

HASTA HOY, la estimación de la vida nominal de los rodamientos se ha basado en modelos de ingeniería que tienen en cuenta una tensión equivalente, originada debajo de la superficie de contacto que se aplica al volumen sometido a tensiones del contacto rodante. A lo largo de los años, la fatiga originada en la superficie como resultado de contaminación o lubricación deficiente se ha incorporado a la estimación de la vida útil del rodamiento aplicando una penalización a la tensión equivalente general del contacto rodante. En el GBLM de SKF, este aspecto se aborda desarrollando un enfoque general de la vida útil del contacto rodante, en cuyas ecuaciones de fatiga básicas se expresan explícitamente con fórmulas los daños originados en la superficie. Esta nueva formulación ofrece la posibilidad de representar mejor la tribología de los rodamientos en los cálculos de su vida útil. Además, proporciona mejores conocimientos de la resistencia superficial que domina el rendimiento en el campo de los rodamientos. Se aborda la capacidad del presente método general de ofrecer información de la tribología y del conflicto entre los mecanismos de fatiga de la superficie y subsuperficie existente en los rodamientos.

LA CONFIABILIDAD de los rodamientos modernos ha ido aumentando

si su uso y lubricación se realizan correctamente. Ello se debe a buenas prácticas, y a una comprensión y aplicación exitosas de los mecanismos tradicionales de la fatiga en los contactos rodantes, y ha sido posible gracias a un material más limpio y buena calidad de fabricación, combinados con métodos confiables de cálculo de la vida nominal. Sin embargo, las tendencias industriales de reducción de tamaño y mayor eficiencia en el rendimiento en el campo siguen incrementando la severidad de las condiciones de trabajo de los rodamientos, especialmente en las superficies de contacto; esto se debe a que la mayoría de las fallas en los rodamientos están relacionadas con la superficie [1]. Para que los rodamientos no representen un cuello de botella en un posterior aumento del rendimiento de la maquinaria moderna, es preciso que la tribología de sus superficies se evalúe mejor en lo que respecta al rendimiento del rodamiento. En la década anterior, SKF consiguió unos avances sustanciales en la esfera de la modelización de la vida útil de la superficie [2-8]. Finalmente, la introducción del Modelo generalizado de cálculo de vida útil de rodamientos (GBLM) de SKF, que separa la superficie de la subsuperficie, ha posibilitado integrar este conocimiento en la vida nominal de los rodamientos

[9]; de esta manera, pueden aplicarse diferentes modelos físicos en estas dos regiones. La fatiga del contacto rodante en la subsuperficie puede tratarse de la forma habitual siguiendo el modelo de capacidad dinámica clásico de Lundberg y Palmgren [10]. El tratamiento de la superficie, en cambio, exige modelos tribológicos más avanzados, que puedan asumir las complejas interacciones físicas que se presentan en contactos hercianos concentrados con tensiones muy altas, como los de la lubricación, fricción, desgaste, fatiga o rodaje.

Esto permite a SKF reflejar, en los pronósticos de vida útil de los rodamientos, diseños más personalizados con características específicas que puedan influir en el rendimiento en el campo de las aplicaciones de rodamientos. Son ejemplos de esto los rodamientos sometidos a tratamiento térmico específico, los de microgeometría avanzada o los de diseño o calidad particulares.

Los clientes podrán aprovechar las características, diferentes y únicas en su clase, de los rodamientos de SKF disponibles en el catálogo de productos, y utilizarlas en cálculos de rendimiento de la vida útil. En última instancia, los clientes podrán utilizar mejor las características y la calidad de los productos de SKF que no pueden representarse simplemente por una sola

carga nominal dinámica en la “subsuperficie” (C), tal como se hace hoy [11].

La capacidad del nuevo enfoque de abordar específicamente los mecanismos de degradación y la tribología de la superficie de los caminos de rodadura permitirá el uso de la versión más avanzada del GBLM en el desarrollo de productos con rodamientos.

Los ingenieros de SKF utilizarán el GBLM para desarrollar diseños de rodamientos mejorados orientados a aplicaciones especiales o para requisitos de rendimiento en el campo particulares. En síntesis, el GBLM representa una herramienta flexible y moderna de clasificación del rendimiento del rodamiento, capaz de incorporar nuevos conocimientos y tecnologías a medida que se vayan desarrollando.

Enfoque de modelización generalizado

El presente modelo conservará el enfoque probabilístico normalizado utilizado hasta hoy en la clasificación de la vida útil de los rodamientos, basada en una distribución de Weibull de dos parámetros, tal como se ha analizado en [12]. Con la teoría del eslabón más débil, Waloddi Weibull [13] introdujo conceptos estocásticos en la determinación de la resistencia y ruptura de elementos estructurales.

Si una estructura está compuesta de n elementos sometidos a diferentes estados de tensión y, por ello, con una probabilidad de supervivencia diferente S_1, S_2, \dots, S_n siguiendo la ley de confiabilidad del producto, la probabilidad de que toda la estructura sobreviva es: ecuación (1).

En su formulación original clásica de capacidad de carga dinámica de los rodamientos [10], Lundberg y Palmgren aplicaron la ley de confiabilidad del producto, ecuación (1), para derivar la función de supervivencia de una estructura

compuesta de n elementos físicos independientes que representan el proceso de degradación de 0 a N ciclos de carga: ecuación (2).

El volumen V puede dividirse en dos o más fuentes independientes de riesgo de daños a la estructura. Considérese que G es una función de la degradación del material que representa el efecto de la acumulación de ciclos de carga (fatiga). Por tanto, las regiones pueden caracterizarse por diferentes funciones de degradación del material que podrían describir procesos de degradación diferentes (o uno individual) $G_{v,1}, G_{v,2}, \dots, G_{v,n}$. Su efecto combinado en la supervivencia de la estructura completa puede expresarse utilizando la ecuación (2). Sin embargo, considérense ahora solamente dos regiones, una para la subsuperficie (región v) y otra para la superficie (región s), a partir de lo cual puede derivarse lo siguiente: ecuación (3).

Siguiendo a la referencia [14], puede obtenerse la integral del

volumen de daños de fatiga usando la amplitud de la tensión σ_v originada por el campo de tensiones hercianas: ecuación (4).

Donde c y h son exponentes, e representa la pendiente de Weibull de la subsuperficie, N es la vida útil de contacto en número de ciclos de carga, z representa la profundidad de análisis, V_v es el volumen de integración, $\sigma_{u,v}$ es el límite de fatiga en el volumen y \bar{A} es una constante de preparación.

De modo similar, se puede describir la función de daños en la superficie. Si en la constante de proporcionalidad de los daños en la superficie \bar{B} se incluye la constante \hat{h} , se obtiene: ecuación (5).

Aquí, m es la pendiente de Weibull de la superficie, A es la superficie de integración, $\sigma_{u,s}$ es el límite de fatiga en la superficie y \bar{B} es una constante de preparación.

En la ecuación de daños en la superficie (5), las tensiones superficiales σ_s deben obtenerse de la geometría de la superficie de las

→

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

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

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

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

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

tensiones de contacto y fricción reales.

Ahora, al combinar las ecuaciones (4) y (5) con la (3), es posible obtener una ecuación de vida útil de contacto con términos separados de la superficie y subsuperficie. Obsérvese que la vida útil en cantidad de revoluciones puede relacionarse con la cantidad de ciclos de carga mediante $L = Nu$, donde u es la cantidad de ciclos de carga por revolución, y teniendo en cuenta que las pendientes de Weibull son muy similares $e = m$, como es el caso de los modos de falla de la superficie correspondientes en los rodamientos, esto finalmente conduce a: ecuación (6).

Esto representa la base de un modelo de cálculo de vida útil de rodamientos que separa explícitamente la superficie de la subsuperficie. El término de la subsuperficie, representado por la integral del volumen, puede resolverse de la misma manera que en la referencia [14] con el uso de técnicas tradicionales de fatiga de contacto rodante herciana. No obstante, el término de la superficie representado por la integral del área ahora ofrece la posibilidad de incluir sistemáticamente en el modelo muchos de los fenómenos tribológicos que caracterizan la resistencia de la superficie del camino de rodadura.

Naturalmente, en este desarrollo se precisa el uso de modelos numéricos avanzados. De hecho, es preciso representar las complejas interacciones de mecanismos de degradación competidores. Por ejemplo: i) fatiga de la superficie en combinación con desgaste leve,

ii) evolución de daños por indentación, iii) interacciones triboquímicas, y muchas otras. En la fig. 1, se muestra una imagen esquemática del concepto principal del GBLM.

Modelos de superficie

En [5], se describe un modelo numérico de deformación superficial que combina fatiga y desgaste leve; dicho modelo requiere, como datos iniciales, mapas de rugosidad digitalizados de las superficies de contacto (fig. 2), y resuelve el problema de la lubricación elastohidrodinámica combinada (con reología no newtoniana).

La solución se realiza en etapas de tiempo a presiones y tensiones calculadas. El modelo de cálculo aplica un criterio de daños y un modelo de desgaste para actualizar la topografía de la superficie, y pasa al siguiente cálculo de etapa de tiempo hasta que se completa un ciclo de carga de rodadura completo. Este proceso numérico se repite millones de veces para todos los puntos de cálculo de la superficie. Ello permite una buena simulación de los fenómenos físicos del proceso de acumulación de daños de desgaste/fatiga en la superficie del camino de rodadura para cada número determinado de rodaduras. En la fig. 3, se muestran resultados típicos de este modelo numérico y se comparan con resultados experimentales de pruebas realizadas en las mismas condiciones que la simulación numérica.

[3, 6, 7] son otros modelos de superficie que pueden utilizarse y resultados integrados en el GBLM. El modelo de deformación

superficial descrito en [5] solo se tiene en cuenta por claridad y como un ejemplo de la flexibilidad del GBLM para integrar modelos de daños en la superficie avanzados. Este modelo se utilizó para realizar un estudio paramétrico usando diferentes condiciones operativas, rugosidad de diferentes tipos y tamaños de rodamientos, y diferentes regímenes de lubricación y contaminación [9]. Con este estudio paramétrico, la integral de la fatiga de la superficie se normalizó y ajustó gráficamente a la siguiente función usando parámetros de rodamiento: ecuación (7).

Aquí, f_1, f_2, \dots, f_5 son constantes, P es la carga dinámica equivalente del rodamiento y P_u es la carga límite de fatiga del rodamiento. El parámetro R_s representa una clasificación de riesgo de daños en la superficie; en otras palabras, es una medida de las tensiones aplicadas en las superficies de rodadura del rodamiento.

Mediante el uso del modelo de deformación superficial avanzado, pueden calcularse diferentes condiciones de lubricación y contaminación del rodamiento, y obtener su efecto en la probabilidad de supervivencia de la superficie. De esta manera, al introducir el parámetro $\eta = \eta_b \eta_c$ [3] (para indicar un mayor o menor riesgo de interacción de superficie), se puede conseguir una representación de la ecuación (7) como función de la carga equivalente adimensional P_u/P para un tipo de rodamiento en particular; véase la fig. 4.

Factores de rendimiento

Posteriormente, pueden tenerse en cuenta características de diseño únicas en los rodamientos de SKF utilizando la metodología antes expuesta para obtener "factores de rendimiento" específicamente diseñados. Estos factores podrían desarrollarse para poder dar mejor cuenta del rendimiento de las características de un diseño en particular y de condiciones operativas específicas.

Por lo general, estos factores

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

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

rigen en el rendimiento de superficies como resultado, por ejemplo, de nuevos tratamientos térmicos o materiales que proporcionan mayor dureza en los caminos de rodadura, del uso de revestimientos, de la introducción de una mejor microgeometría en los caminos de rodadura y de acabados superficiales. No obstante, en el futuro, el uso de factores de rendimiento específicos también puede abarcar la subsuperficie e incluso aspectos particulares de lubricantes o de la lubricación. Básicamente, la estructura del GBLM permite la incorporación consecuente de nuevas tecnologías de rodamientos y conocimientos de pronóstico de rendimiento afines, a medida que vayan estando disponibles.

Como ejemplo de un factor de rendimiento relacionado con la probabilidad de supervivencia de la superficie del camino de rodadura, se puede considerar la introducción de caminos de rodadura de rodamientos de mayor dureza, es decir, dotados de mejor resistencia al desgaste y a la contaminación, en especial en condiciones de lubricación reducida. Conocer el rendimiento mejorado previsto de la resistencia de la superficie puede ser un factor en la ecuación (7), utilizando un factor de rendimiento que reduzca el riesgo de daños en la superficie, tal como se muestra en la fig. 5.

Obsérvese que, en este caso particular, el factor de rendimiento se desarrolló para solo abordar una cierta región de las condiciones operativas del rodamiento. Tal como se muestra en la fig. 5, la reducción más significativa de la clasificación de riesgo de la superficie tiene lugar en su zona de alto riesgo; a medida que aumenta el parámetro η y se reduce el riesgo, también se reduce la influencia del factor de rendimiento. Esto muestra la capacidad de este factor de rendimiento del GBLM, de abordar específicamente las condiciones de lubricación deficiente o alta contaminación de la condición del rodamiento en el

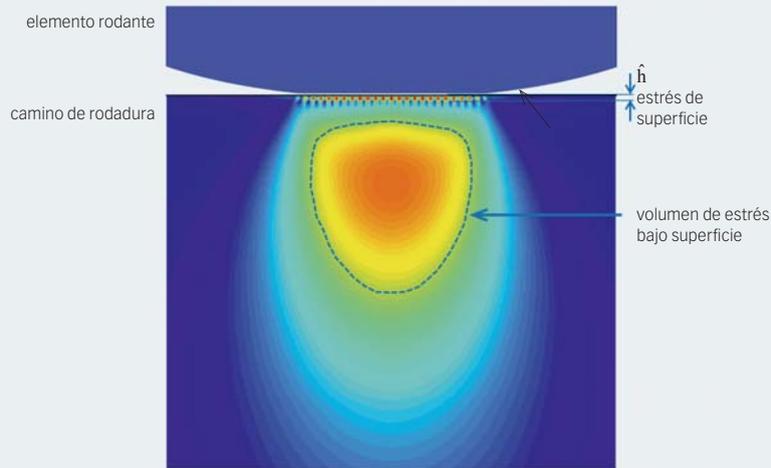


Fig. 1: Separación de la superficie y la subsuperficie, tal como sugiere el GBLM.

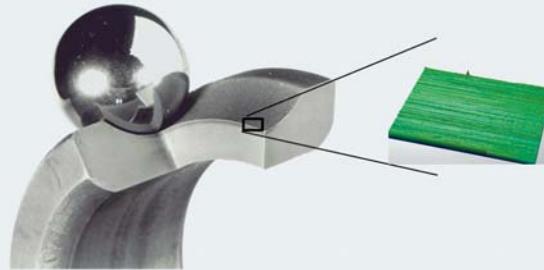
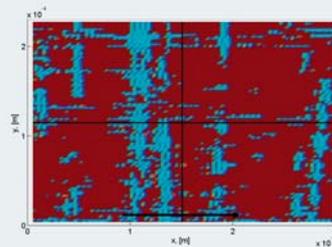


Fig. 2: Digitalización de la rugosidad de los caminos de rodadura de los rodamientos, utilizando un perfilómetro óptico para un mapeo tridimensional de la superficie.



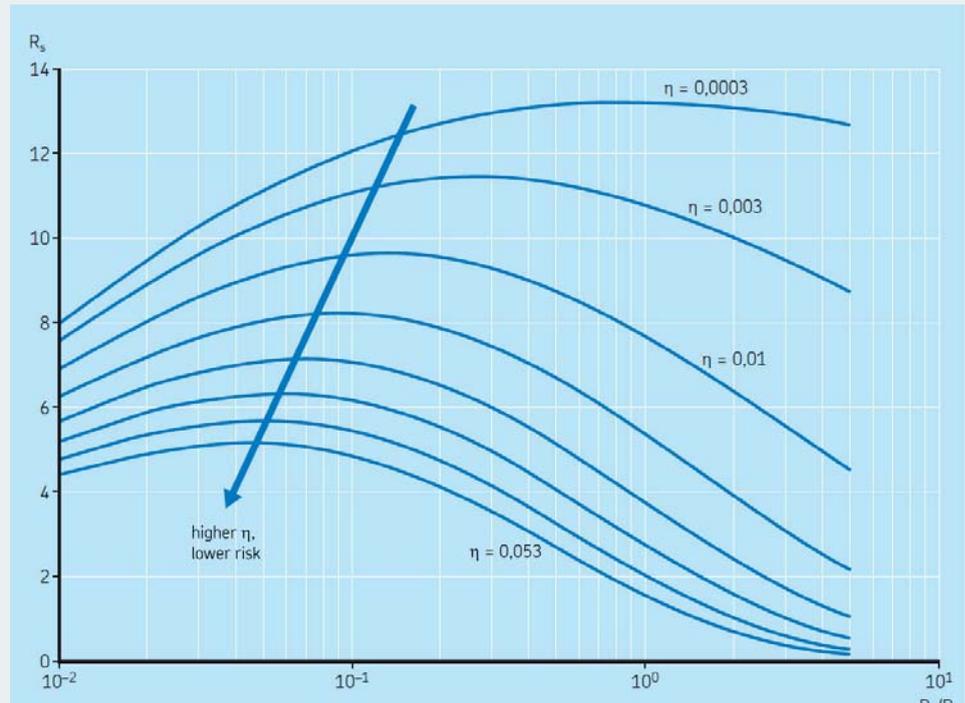
(a) Resultados del modelo



(b) Experimento

Fig. 3: Resultados típicos de deformación superficial avanzada de [5].

Fig. 4: Ejemplo de clasificación de riesgo de la superficie en función de los regímenes de carga y lubricación/contaminación.



que se espera la reducción más significativa del riesgo en la supervivencia de la superficie.

Riesgo en superficies normalizadas

Puesto que el GBLM es capaz de separar los términos de resistencia de la superficie y subsuperficie, es posible sopesar su impacto relativo sobre el rendimiento dinámico general del rodamiento.

Por ejemplo, al introducir: i) la integral de superficies normalizadas o riesgo de daños en la superficie R_s , ii) la integral de tensiones en subsuperficies normalizadas o riesgo de daños en la subsuperficie R_{ss} , y iii) el coeficiente de escala c , se puede obtener el riesgo en las superficies normalizadas de los rodamientos, que es: ecuación (8).

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

Este parámetro puede variar de 0 a 1. Cuando es cerca de 1, el peso de la fatiga sobre la superficie es dominante con respecto a la subsuperficie; cuando es cerca de 0, rige lo contrario. Este es un parámetro importante para comprender qué zona de tensiones del rodamiento está expuesta al riesgo más elevado. Con esta información, los ingenieros de aplicaciones y los clientes pueden planificar medidas correctivas para incrementar al máximo el rendimiento de los rodamientos y reducir costos.

Validación del modelo

Cuando las condiciones operativas son similares, el GBLM dará resultados que concuerdan con la clasificación de vida útil de SKF y, asimismo, en gran parte, con los

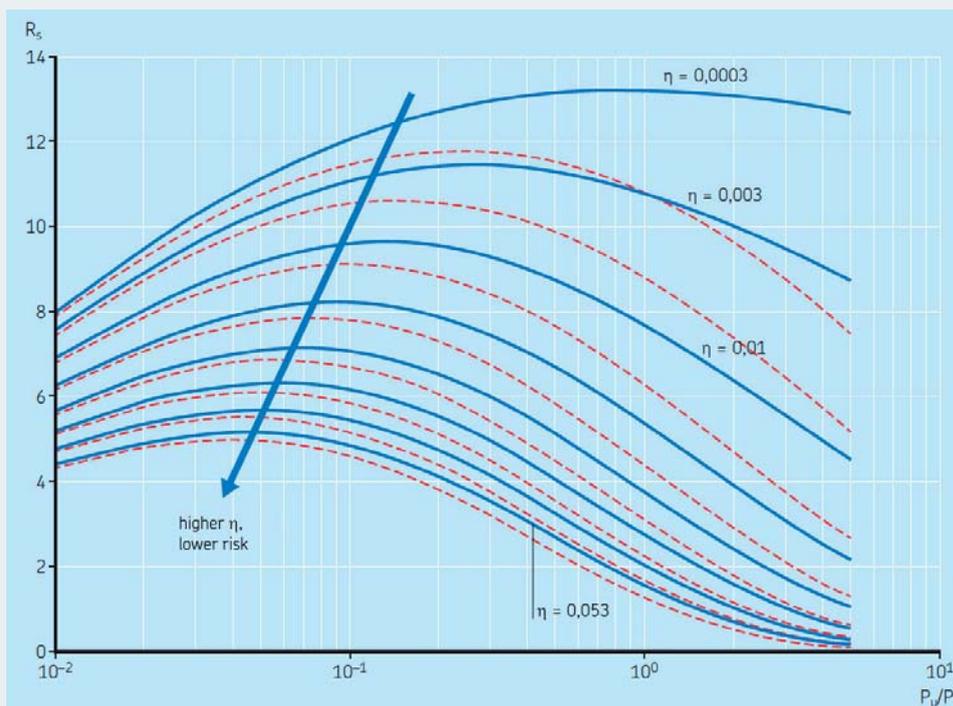
modelos de clasificación de vida útil ISO 281. Esto se debe a que el GBLM se ha validado con respecto a los resultados de la extensa base de datos de pruebas de resistencia de SKF. Dicha base de datos se incrementa y actualiza constantemente para estar al día con el desarrollo de nueva tecnología de rodamientos.

La introducción de factores de rendimiento alterará gradualmente la vida útil pronosticada. Sin embargo, esto es una consecuencia de las modificaciones en el rendimiento introducidas por nuevos aspectos en el diseño de rodamientos, que ahora serán visibles en la vida nominal. En todos los casos, SKF se cerciora de que los cambios en el rendimiento de los rodamientos estén respaldados por pruebas de resistencia adecuadamente realizadas.

Beneficios del GBLM para los clientes

Los clientes pueden obtener ventajas significativas de la introducción

Fig. 5: Ejemplo de clasificación de riesgo de la superficie en función de los regímenes de carga, y de lubricación y contaminación. Las líneas rojas discontinuas muestran el efecto de un factor de rendimiento como resultado de introducir un tratamiento térmico que mejora la dureza de la superficie del camino de rodadura.



del GBLM en la clasificación de la vida nominal del rodamiento. De hecho, el cálculo del rendimiento de la resistencia prevista del rodamiento estará complementado por conocimientos sobre el riesgo de la superficie de la aplicación. En caso de que la condición de aplicación del rodamiento dé como resultado un riesgo predominante sobre la superficie, pueden adoptarse medidas correctivas y cuantificarse su efecto sobre el riesgo en la supervivencia de la superficie. En otras palabras, el GBLM puede proporcionar una herramienta de diagnóstico para mejorar el rendimiento en el campo del rodamiento al reducir las fallas originadas en la superficie.

En general, un alto riesgo de la superficie como resultado de una lubricación reducida y del aumento de la contaminación no puede resolverse adoptando un rodamiento con una capacidad de carga dinámica mayor y de tamaño más grande. Esto puede controlarse rápidamente por el efecto de una

capacidad de carga mayor y de un tamaño de rodamiento más grande sobre el riesgo en la superficie normalizada. Por tanto, el cliente puede beneficiarse a partir del uso del GBLM al realizar una selección con más datos del rodamiento, de los componentes circundantes y del sistema de lubricación a fin de incrementar al máximo el rendimiento y reducir el costo general de la aplicación.

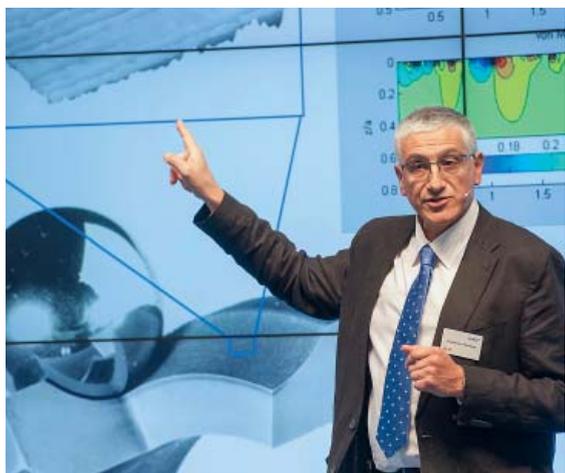
Resumen y conclusiones

Con la introducción del Modelo generalizado de cálculo de vida útil de rodamientos (GBLM) de SKF, se ha presentado una forma más flexible de expresar su vida útil, separando explícitamente los términos relacionados con los modos de falla de la superficie, de los términos generales de fatiga de la subsuperficie por contacto rodante. Este modelo introduce el uso de factores de rendimiento, y es posible abordar características específicas de los rodamientos y diseños

o aplicaciones más personalizados. El modelo, aparte de estimar la vida nominal de los rodamientos, también calcula un valor de riesgo S_R en superficies normalizadas para ofrecer una indicación clara de la importancia de la fatiga de la superficie en comparación con la de la subsuperficie.

En general, pueden mencionarse las siguientes conclusiones:

1. El Modelo generalizado de cálculo de vida útil de rodamientos de SKF es un nuevo modelo que hace una clara separación entre los términos que afectan a la superficie y los que afectan a la subsuperficie, y constituye una manera más flexible de expresar la actual vida nominal de SKF.
2. Este es el único modelo existente de vida útil de los rodamientos capaz de contener explícitamente términos relacionados con la subsuperficie y la superficie en forma separada en su formulación, incorporando fácilmente los →



Feria Hannover Messe, abril de 2015, Guillermo E. Morales-Espejel presentando el Modelo generalizado de cálculo de vida útil de rodamientos de SKF.

conocimientos obtenidos con el uso de avanzados modelos tribológicos numéricos.

3. En este modelo, son nuevos elementos los factores de rendimiento que representan mejoras de diseño específicas desarrolladas por SKF en las características de los rodamientos y/o diseño, que afectan al rendimiento del rodamiento en una aplicación con condiciones operativas concretas.
4. El GBLM puede considerarse como una plataforma de modelos que pueden ir creciendo a medida que se vayan desarrollando nuevos conocimientos, lo que permite una fácil incorporación al sopesar diferentes fenómenos que afecten específicamente a las zonas de la superficie o subsuperficie de los rodamientos.
5. El Modelo generalizado de cálculo de vida útil de rodamientos de SKF estará disponible para los clientes en un futuro cercano. ●

Autores:

Guillermo E. Morales-Espejel,

Investigador principal, SKF Engineering & Research Centre, Nieuwegein, Países Bajos

Antonio Gabelli,

Investigador sénior, SKF Engineering & Research Centre, Nieuwegein, Países Bajos

Referencias

- [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 – 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.