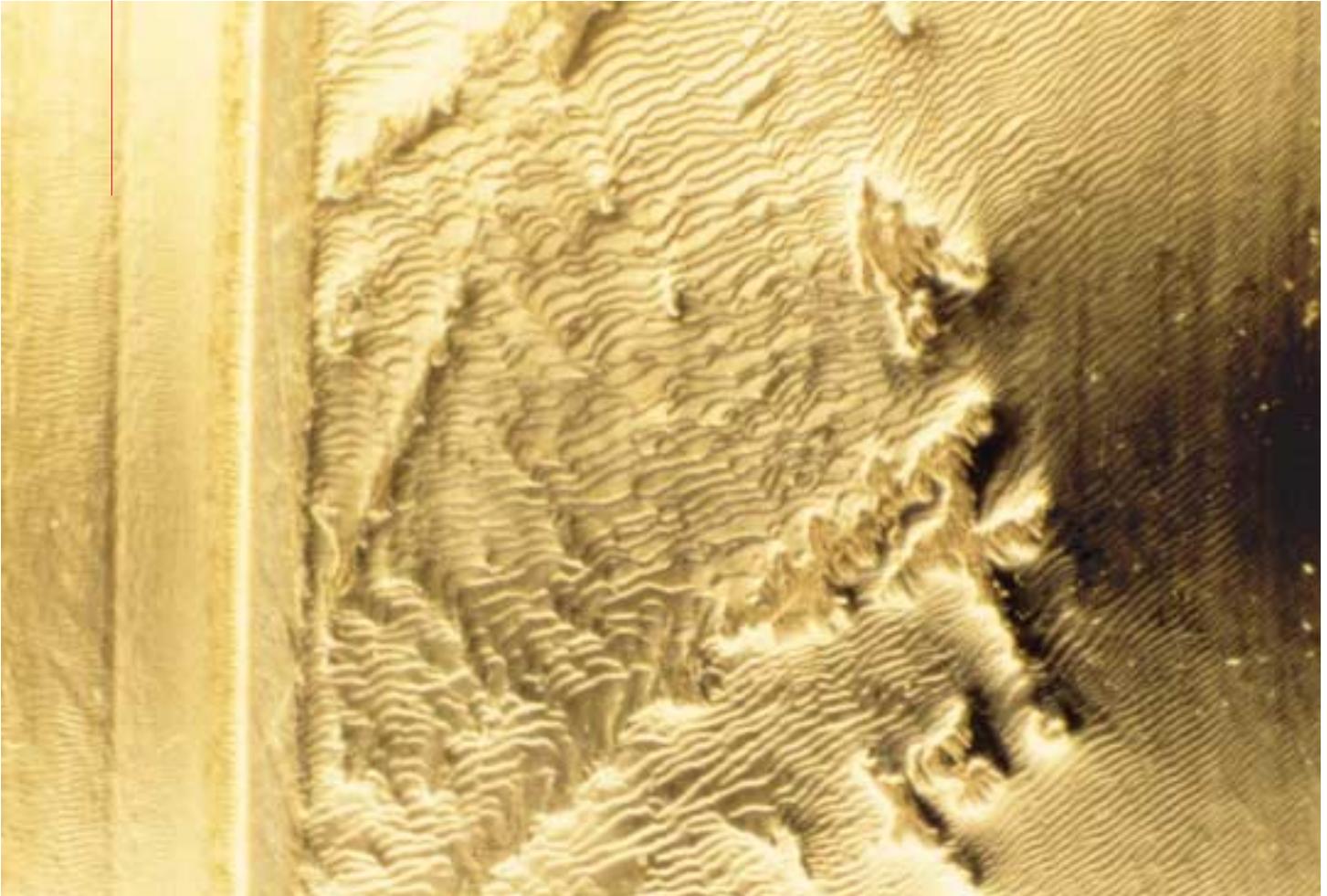


Averías de los rodamientos



Reconocimiento de daños e inspección de rodamientos

Averías de los rodamientos

Reconocimiento de daños e inspección
de rodamientos

N.º publ. WL 82 102/2 SB

FAG Sales Europe GmbH - España

Una filial del Grupo FAG Kugelfischer

Apartado 278 · E-08190 Sant Cugat del Vallès (Barcelona)
Teléfono: +34 93 590 65 00 · Telefax +34 93 675 93 90
<http://www.fag.com>

Los rodamientos son elementos mecánicos con un amplio campo de aplicación. Su fiabilidad ha quedado demostrada incluso en condiciones de servicio severas. Los fallos prematuros son poco frecuentes.

Las averías en los rodamientos se pueden reconocer ante todo por un comportamiento irregular en la aplicación del rodamiento. En la investigación de rodamientos dañados se pueden advertir las más diversas características. En la mayoría de los casos, para encontrar la causa de la avería no basta con el simple reconocimiento del rodamiento; también se han de tener en cuenta sobre todo las piezas del entorno, la lubricación y la obturación, así como las condiciones de servicio y las relacionadas con el medio ambiente. Un modo de proceder sistemático en la investigación facilita el descubrimiento de las causas.

La presente publicación está ideada, sobre todo, como manual para taller. Proporciona una visión general de las averías típicas de los rodamientos, sus causas y las medidas para prevenirlas. Además de la explicación de los cuadros de daños, también se explican posibles formas de reconocimiento precoz de los daños.

En el ámbito del mantenimiento preventivo que se realiza con frecuencia se encuentran también rodamientos que no se pueden considerar dañados. Por este motivo se muestran ejemplos de rodamientos con características de rodadura habituales para la correspondiente vida de servicio.

Acerca de la ilustración de la portada: Lo que a primera vista parece un paisaje de dunas fotografiado desde gran altura es, en realidad, el perfil ondulado de deformación- desgaste de un rodamiento axial de rodillos cilíndricos. Las diferencias entre crestas y valles son inferiores a 1 mm. A bajas velocidades de rotación se produce un rozamiento mixto en las superficies de contacto sometidas a carga por deslizamiento. La formación de los “rizos” se debe a efectos de movimiento relativo no elástico.

| | Página | | Página |
|----------|--|----|--------|
| 1 | Comportamiento irregular en servicio como indicio de averías | | |
| 1.1 | Reconocimiento subjetivo de daños | 4 | |
| 1.2 | Monitorización de rodamientos con ayuda de medios técnicos | 4 | |
| 1.2.1 | Daños de gran superficie | 4 | |
| 1.2.2 | Daños puntuales | 6 | |
| 1.3 | Urgencia en la sustitución de un rodamiento - Vida remanente | 7 | |
| 2 | Aseguramiento de rodamientos averiados | 9 | |
| 2.1 | Determinación de los datos de servicio | 9 | |
| 2.2 | Toma de muestras de lubricante y valoración de las mismas | 9 | |
| 2.3 | Comprobación del entorno del rodamiento | 10 | |
| 2.4 | Dictamen del rodamiento cuando está montado | 10 | |
| 2.5 | Desmontaje del rodamiento averiado | 10 | |
| 2.6 | Control de los asientos | 10 | |
| 2.7 | Dictamen del rodamiento completo | 10 | |
| 2.8 | Envío a FAG o dictamen de las diferentes piezas del rodamiento | 10 | |
| 3 | Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado | 11 | |
| 3.1 | Medidas preparatorias | 14 | |
| 3.1.1 | Identificación de las distintas piezas | 14 | |
| 3.1.2 | Mediciones realizadas en el rodamiento completo | 14 | |
| 3.1.3 | Desmontaje del rodamiento en sus diferentes componentes | 14 | |
| 3.1.4 | Dictamen de los componentes del rodamiento | 14 | |
| 3.2 | El estado de las superficies de asiento | 15 | |
| 3.2.1 | Corrosión de contacto - Corrosión en el ajuste | 15 | |
| 3.2.2 | Huellas de gripado o desgaste por deslizamiento | 16 | |
| 3.2.3 | Apoyo no uniforme de los aros del rodamiento | 17 | |
| 3.2.4 | Huellas de rozamiento laterales | 18 | |
| 3.3 | Huellas de rodadura características | 19 | |
| 3.3.1 | Aparición e importancia de las huellas de rodadura | 19 | |
| 3.3.1.1 | Huellas de rodadura normales | 19 | |
| 3.3.1.2 | Huellas de rodadura poco habituales | 21 | |
| 3.3.2 | Indentaciones en los caminos de rodadura y en las superficies de los elementos rodantes | 27 | |
| 3.3.2.1 | Roturas | 27 | |
| 3.3.2.2 | Daños por corrosión | 34 | |
| 3.3.2.3 | Falso brinelling | 36 | |
| 3.3.2.4 | Indentaciones producidas por los elementos rodantes | 37 | |
| 3.3.2.5 | Cráteres y estrías transversales originados por el paso de corriente | 38 | |
| 3.3.2.6 | Marcha de los elementos rodantes sobre los rebordes | 39 | |
| 3.3.3 | Roturas de aros | 40 | |
| 3.3.3.1 | Roturas ocasionadas por fatiga del camino de rodadura | 40 | |
| 3.3.3.2 | Fisuras incipientes o roturas de aros interiores en dirección axial | 40 | |
| 3.3.3.3 | Roturas del aro exterior en sentido circunferencial | 41 | |
| 3.3.4 | Rayado y huellas de deslizamiento en las superficies de contacto | 42 | |
| 3.3.4.1 | Daños por desgaste debidos a una lubricación deficiente | 42 | |
| 3.3.4.2 | Rayado de las superficies en los elementos rodantes | 44 | |
| 3.3.4.3 | Huellas de deslizamiento | 45 | |
| 3.3.4.4 | Estrías longitudinales | 46 | |
| 3.3.5 | Daños debidos a sobrecalentamiento | 47 | |
| 3.4 | Valoración del contacto con el borde | 48 | |
| 3.4.1 | Daños en las superficies del borde y en las superficies frontales de los rodillos en los rodamientos de rodillos | 48 | |
| 3.4.1.1 | Rayas producidas por cuerpos extraños | 48 | |
| 3.4.1.2 | Fenómenos de atascamiento en el contacto con el borde | 49 | |
| 3.4.1.3 | Desgaste en el contacto con el borde | 50 | |
| 3.4.1.4 | Roturas del borde | 51 | |
| 3.4.2 | Desgaste de las superficies guía de las jaulas | 52 | |
| 3.4.3 | Daños producidos en las superficies de apoyo de las obturaciones | 53 | |
| 3.4.3.1 | Desgaste en la zona de apoyo de los labios obturadores | 53 | |
| 3.4.3.2 | Descoloración de la huella de giro en la superficie de apoyo de la obturación | 53 | |
| 3.5 | Daños en la jaula | 54 | |
| 3.5.1 | Desgaste producido a consecuencia de falta de lubricante y contaminación | 54 | |
| 3.5.2 | Desgaste producido a consecuencia de una velocidad de giro excesivamente elevada | 54 | |
| 3.5.3 | Desgaste producido a consecuencia del ladeo de los rodillos | 55 | |
| 3.5.4 | Desgaste de las jaulas de rodamientos de bolas producido por desalineación | 55 | |
| 3.5.5 | Rotura de las uniones de la jaula | 56 | |
| 3.5.6 | Rotura de la jaula | 56 | |
| 3.5.7 | Daños producidos por un montaje incorrecto | 57 | |
| 3.6 | Daños en la obturación | 58 | |
| 3.6.1 | Desgaste de los labios de obturación | 58 | |
| 3.6.2 | Daños producidos por un montaje inadecuado | 59 | |
| 4 | Posibilidades de inspección en FAG | 60 | |
| 4.1 | Medición geométrica de rodamientos y partes de rodamientos | 60 | |
| 4.2 | Análisis y ensayos de lubricantes | 63 | |
| 4.3 | Control del estado del material | 65 | |
| 4.4 | Análisis radiográfico de la microestructura | 66 | |
| 4.5 | Investigaciones por microscopía electrónica de barrido | 67 | |
| 4.6 | Ensayos de componentes | 69 | |
| 4.7 | Comprobación por cálculo de las condiciones de carga | 71 | |

Comportamiento irregular en servicio como indicio de averías

Reconocimiento subjetivo de daños · Control de los rodamientos con ayuda de medios técnicos

1 Comportamiento irregular en servicio como indicio de averías

Generalmente, las averías de los rodamientos se ponen de manifiesto por un empeoramiento paulatino del comportamiento en servicio. Son poco frecuentes los daños causados, por ejemplo, por defectos de montaje o por la falta de lubricante, que den lugar a una detención inmediata de la máquina. Según las condiciones de servicio, desde el inicio del deterioro hasta el fallo efectivo transcurren desde algunos minutos hasta, según las circunstancias, incluso meses. El tipo de control de los rodamientos depende del empleo y de las repercusiones de una avería del rodamiento sobre el funcionamiento de la máquina.

1.1 Reconocimiento subjetivo de daños

En la mayoría de aplicaciones de rodamientos, para evitar daños mayores es suficiente con que el personal de servicio preste atención a los rodamientos por si se produjese una marcha irregular o ruidos inusuales; véase tabla de la figura 1.

1.2 Monitorización de rodamientos con ayuda de medios técnicos

Los rodamientos cuyos daños representan un riesgo para la seguridad o que pueden dar lugar a una pérdida de producción relativamente importante requieren, a diferencia del caso anterior, una vigilancia minuciosa y continuada. Constituyen ejemplos a este respecto las turbinas de los aviones o las máquinas papeleras. En estos casos, para que el tipo de control sea fiable deberá estar orientado al tipo de daño que se puede esperar.

1.2.1 Daños de gran superficie

El requisito fundamental para un funcionamiento sin problemas consiste en proporcionar el suficiente lubricante limpio. Las condiciones desfavorables se pueden detectar del modo siguiente:

1: Reconocimiento de daños por el personal de servicio

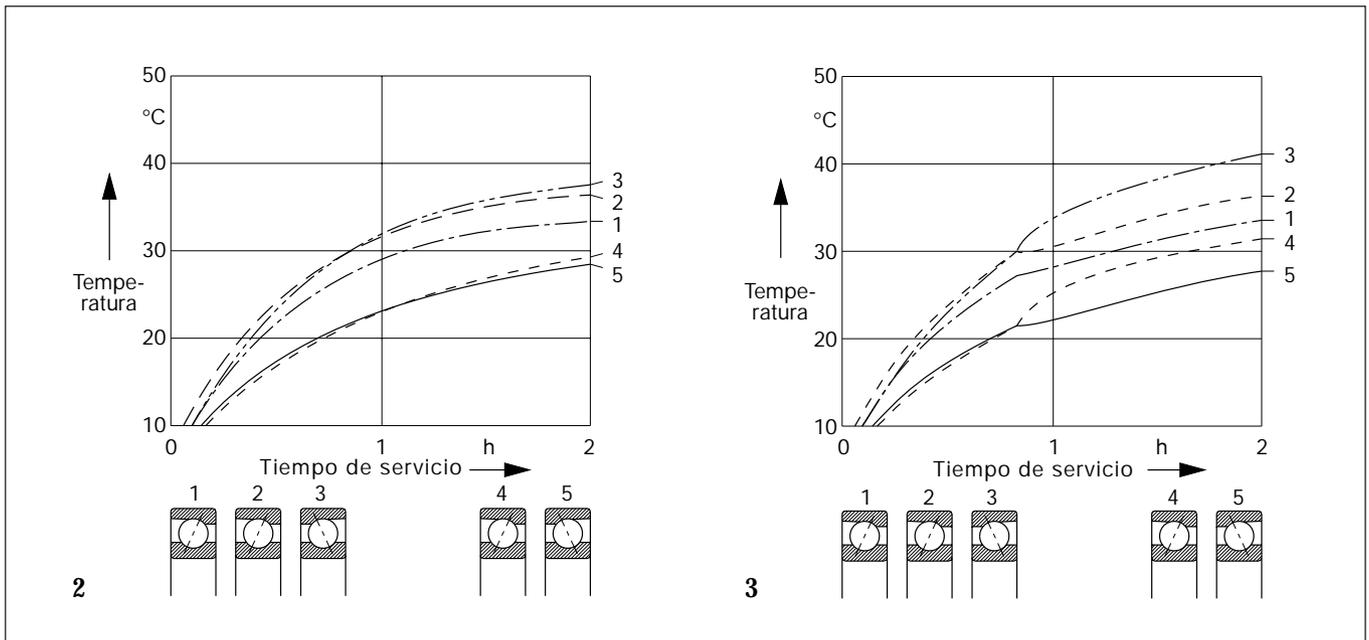
| Comportamiento en servicio | Posibles causas | Ejemplos |
|---|--|---|
| Funcionamiento irregular | Deterioro de los aros y elementos rodantes | Automóviles: Oscilación creciente de las ruedas Aumento del ladeo Sacudidas de los elementos de dirección |
| | Contaminación | Ventiladores: Vibración de intensidad creciente |
| | Juego excesivo del rodamiento | Sierras: Choques y golpes de intensidad creciente en los tirantes |
| Disminución de la precisión de trabajo | Desgaste a consecuencia de contaminación o de lubricación insuficiente | Torno: Aparición progresiva de marcas de vibraciones en la pieza mecanizada |
| | Deterioro de los aros y elementos rodantes | Rectificadoras: Aspecto ondulado de la superficie rectificada |
| | Variación del ajuste (juego o precarga) | Tren de laminación en frío: Aparición de defectos superficiales, generalmente periódicos, en el material laminado, como sombreados, huellas onduladas, y otros fenómenos similares |
| Ruido de servicio inusual: Ruido ululante o silbante | Insuficiente juego interno de servicio | Motores eléctricos Engranajes (en los engranajes, los ruidos de los rodamientos son difícilmente reconocibles, porque predomina por lo general el ruido de las ruedas dentadas) |
| | Ruido en forma de ronquido o irregular | Excesivo juego interno de servicio Daños en las superficies de los rodillos Contaminación Lubricante inadecuado |
| | Variación paulatina del ruido de servicio | Variación del juego interno de servicio por influencia de la temperatura Caminos de rodadura dañados (p.ej. por contaminación o fatiga) |

Comportamiento irregular en servicio como indicio de averías

Control de los rodamientos con ayuda de medios técnicos

2: Evolución de la temperatura en el caso de una máquina herramienta con apoyo de husillo principal en perfecto estado
Condición del ensayo: $n \cdot d_m = 750\,000 \text{ min}^{-1} \cdot \text{mm}$.

3: Evolución de la temperatura con función de rodamiento libre alterada. Condición del ensayo: $n \cdot d_m = 750\,000 \text{ min}^{-1} \cdot \text{mm}$.



- Control del suministro de lubricante
 - Mirilla del nivel de aceite
 - Medición de la presión de aceite
 - Medición del caudal de aceite
- Medición de partículas procedentes del desgaste en el lubricante
 - de forma discontinua
 - Tapón magnético
 - Análisis espectral de muestras de lubricante
 - Investigación de muestras de aceite en el laboratorio
 - de forma continua
 - Emisor de señales magnético
 - Determinación de la cantidad de partículas en circulación con un contador de partículas en línea
- Medición de la temperatura
 - en general, con elementos termoelectrónicos

Un procedimiento muy fiable y de aplicación relativamente sencilla para el reconocimiento de daños debidos al lubricante es, sobre todo, la medición de la temperatura.

Comportamiento normal de la temperatura:

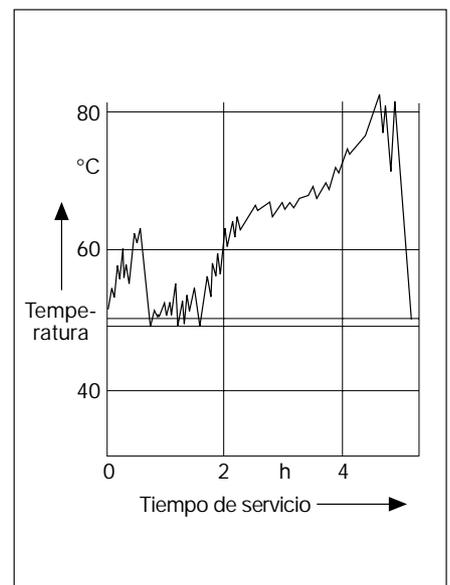
- cuando se alcanza una temperatura de régimen en el funcionamiento estacionario, figura 2.

Comportamiento anómalo:

- aumento repentino de la temperatura, causado por la falta de lubricante o por una excesiva precarga, radial o axial, del rodamiento, figura 3.
- evolución irregular de la temperatura, con valores máximos de tendencia ascendente, debido a un empeoramiento general del estado de la lubricación, p. ej., al alcanzarse la duración de servicio del lubricante, figura 4.

Sin embargo, las mediciones de la temperatura no son apropiadas para registrar con antelación daños locales, como p. ej. fatigas.

4: Evolución de la temperatura en función del tiempo en caso de una lubricación con grasa deficiente. Condición del ensayo: $n \cdot d_m = 200\,000 \text{ min}^{-1} \cdot \text{mm}$.



Comportamiento irregular en servicio como indicio de averías

Control de los rodamientos con ayuda de medios técnicos

1.2.2 Daños puntuales

Si en un rodamiento se producen daños estrictamente delimitados, como p. ej., impresiones en cuerpos rodantes, corrosión durante las paradas de servicio o roturas, la forma más rápida de reconocerlos es por medio de mediciones de vibraciones. En la rodadura sobre las impresiones locales se producen ondas de choque, que pueden ser registradas por captadores de desplazamiento, de velocidad o de aceleración. Dependiendo de las condiciones de servicio y de la exactitud de la información, estas señales se pueden procesar ulteriormente de forma más o menos costosa. Los procedimientos más difundidos son:

- medición del valor efectivo
- medición del impulso de choque
- análisis de señal por detección de envolvente

Sobre todo en el caso del último procedimiento mencionado se dispone de buenas experiencias en lo referente a fiabilidad operacional y empleo práctico. Debido al tipo especial de preparación de la señal es posible incluso llegar a conclusiones sobre los componentes del rodamiento dañados; véanse figuras 5 y 6. Se pueden obtener informaciones más detalladas al respecto en nuestra publicación WL 80 136 "Diagnóstico de rodamientos en máquinas e instalaciones > FAG Rolling Bearing Analyser<".

6: Daños en el aro interior detectados por medio del procedimiento de envolvente en un rodamiento oscilante de rodillos de una máquina papelera

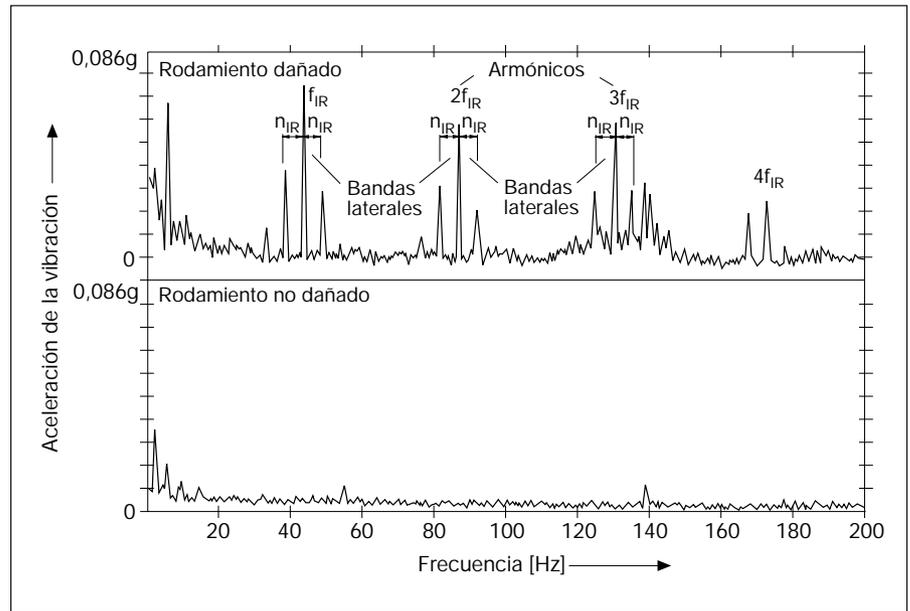


5: Espectro de frecuencia de la señal de la envolvente entre 0 y 200 Hz.

Abajo: rodamiento sin daños; arriba: rodamiento dañado

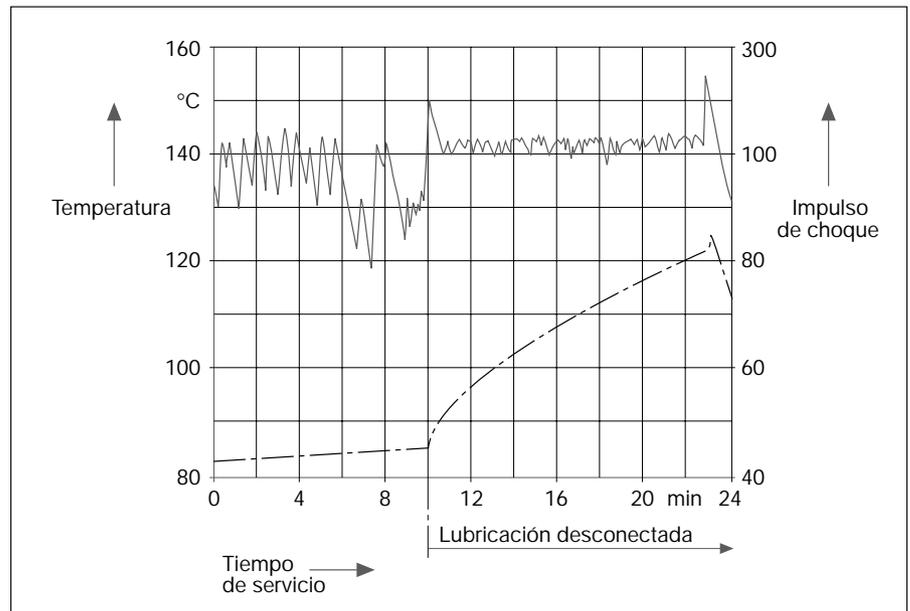
n_{IR} Velocidad de rotación del aro interior [min^{-1}]

f_{IR} Frecuencia de la señal del aro interior (frecuencia de paso de los cuerpos rodantes) [Hz]



7: Evolución de la temperatura e impulso de choque en función del tiempo después de la desconexión de la lubricación.

Rodamientos para husillos B7216E.TPA; P/C = 0,1; n = 9000 min^{-1} ; aceite lubricante ISO VG100.



Comportamiento irregular en servicio como indicio de averías

Control de los rodamientos con ayuda de medios técnicos

Los procedimientos de medición de la vibración son muy adecuados para determinar los daños por fatiga. El caso más fácil de aplicación de estos procedimientos lo constituyen los rodamientos con contacto puntual (rodamientos de bolas), pero con procedimientos de valoración más perfeccionados, como por ejemplo la detección de envoltentes, se reconocen daños en rodamientos de rodillos con la misma seguridad. Sin embargo, estos procedimientos son menos empleados para la observación del estado de lubricación. Un fallo del suministro de lubricante se reconoce de forma fiable, como se describe arriba, mediante una medición de la temperatura. En la figura 7 se encuentra perfectamente detallado. En este caso, la medición del impulso de choque reacciona de forma notablemente menos sensible que el sensor de la temperatura. Así pues, sobre todo la medición de la temperatura y la medición de la vibración se complementan mutuamente con gran eficacia en las instalaciones técnicamente costosas.

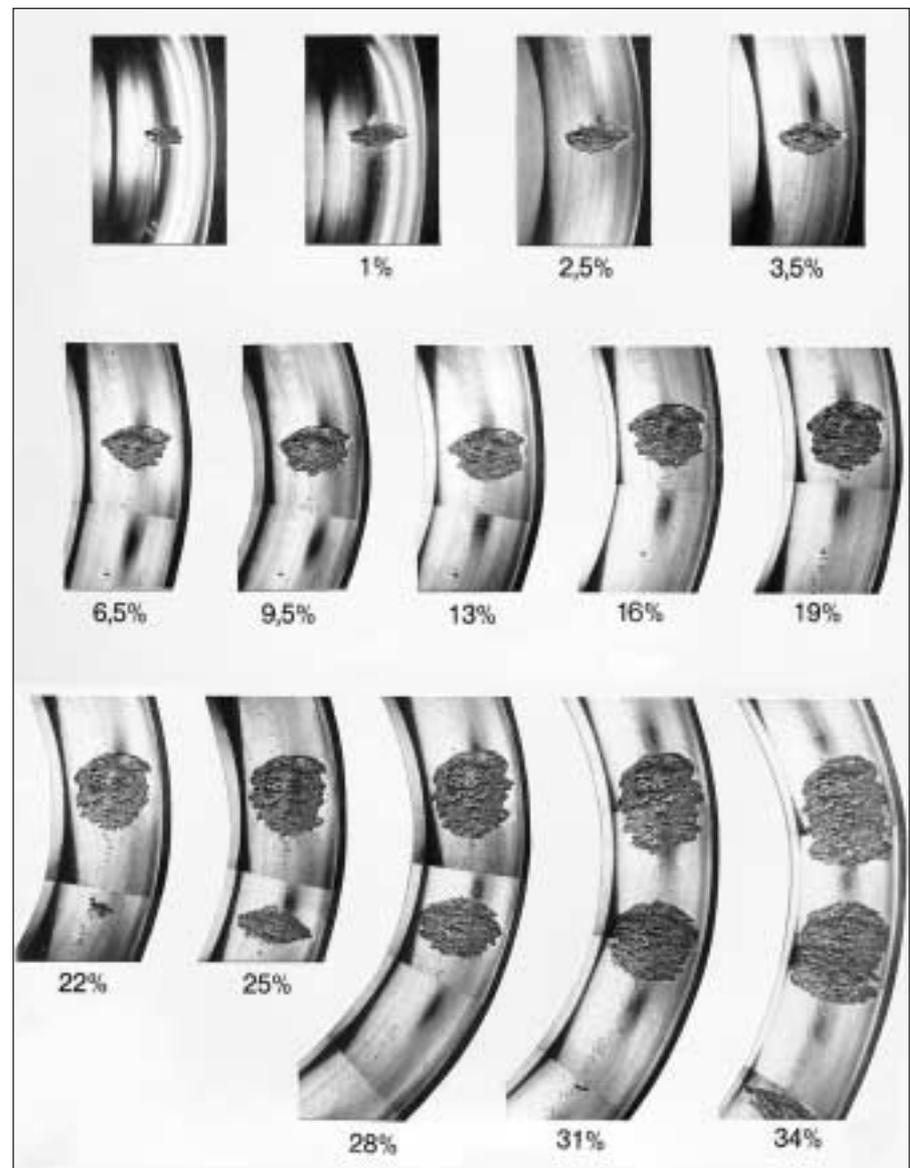
1.3 Urgencia en la sustitución de un rodamiento - Vida remanente

Una vez se ha reconocido un deterioro en el rodamiento, se plantea la cuestión de si es precisa una sustitución inmediata o si el rodamiento puede continuar en uso hasta la siguiente parada programada de la máquina. La respuesta a esta pregunta depende de una serie de condiciones. Así, por ejemplo, si la disminución de la precisión de trabajo de una máquina herramienta es motivo para la sospecha de una avería en los rodamientos, la urgencia en la sustitución del rodamiento depende en primer término de durante cuánto tiempo se pueden seguir fabricando piezas de calidad aceptable. En el caso de rodamientos que se han gripado repentinamente por sobrecalentamiento a consecuencia de una interrupción no detectada del suministro de lubricante a velocidad de rotación elevada, es necesaria evidentemente una sustitución inmediata.

Sin embargo, en un gran número de casos, todavía es posible en principio que la máquina siga funcionando sin merma de la calidad del producto aunque exista un daño. El tiempo durante el cual esto es posible depende en este caso de la sollicitación de carga del rodamiento, la velocidad

de rotación, la lubricación y la limpieza del lubricante. Se han realizado extensas investigaciones sobre la evolución de los daños con diversas condiciones de carga en rodamientos de bolas. Los principales resultados obtenidos al respecto son:

8: Evolución de daños por fatiga en el camino de rodadura del aro interior de un rodamiento de bolas de contacto angular. El intervalo de tiempo entre las revisiones desde el inicio del daño está indicado en % del tiempo de duración nominal L_{10}



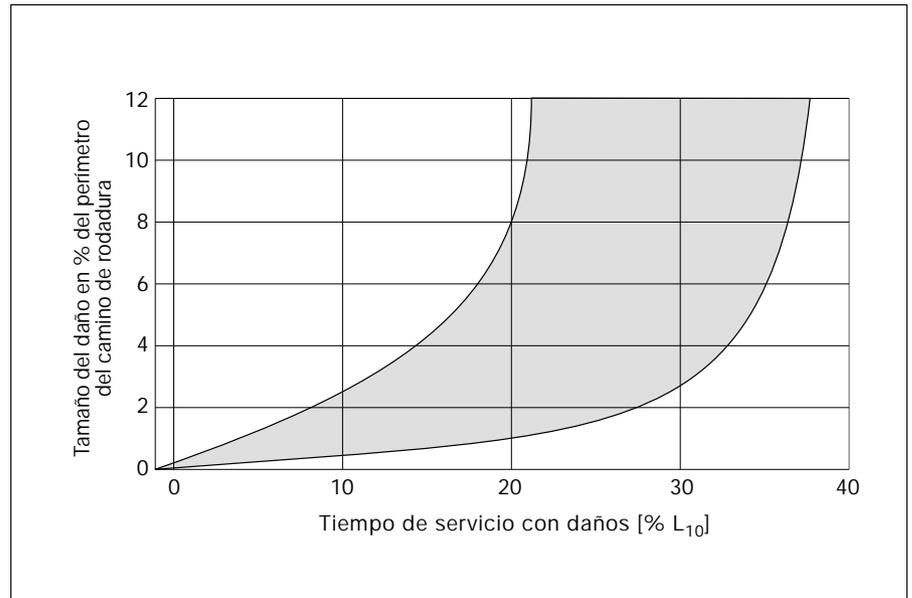
Comportamiento irregular en servicio como indicio de averías

Urgencia en la sustitución de un rodamiento

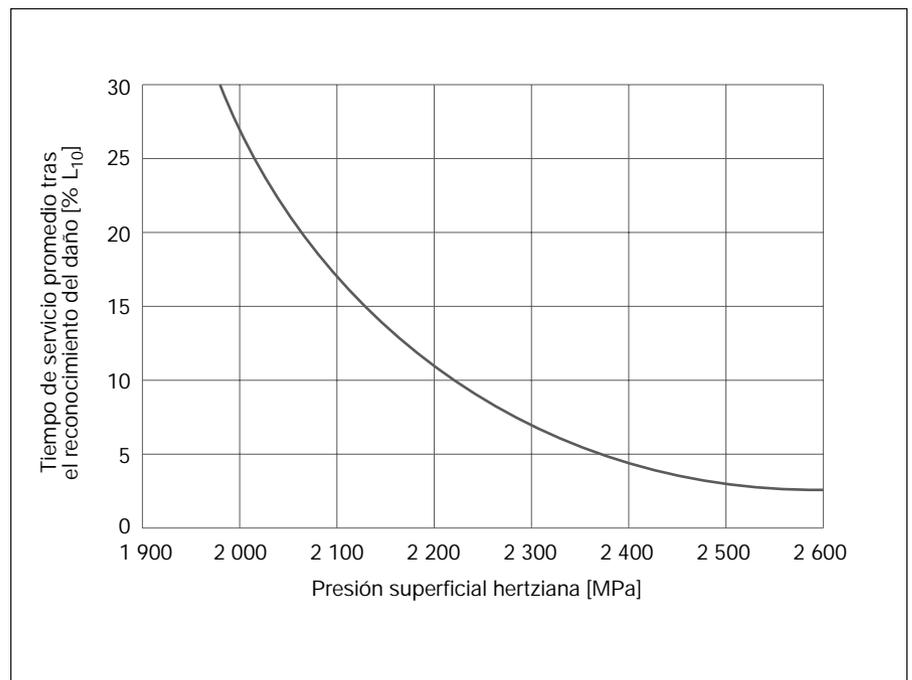
- En caso de carga moderada, un deterioro progresa lentamente, de forma que se puede esperar a la siguiente parada programada para sustituir el rodamiento.
- Al aumentar la carga, el deterioro se extiende con mucha mayor rapidez.
- Al principio, el daño crece lentamente. Al aumentar el grado del daño aumenta también de modo considerable la velocidad de propagación.

Estos hallazgos se ilustran en la figuras 8 (página 7), 9 y 10.

9: Tamaño del daño en función del tiempo de servicio desde el reconocimiento del daño (si está exfoliado aproximadamente el 0,1 % del perímetro del camino de rodadura)



10: Tiempo promedio de servicio remanente de los rodamientos de bolas de contacto angular tras el reconocimiento de un daño por fatiga, en función de la sollicitación, hasta que está dañado 1/10 del perímetro del camino de rodadura. Condición de servicio antes del inicio del primer daño por fatiga: limpieza máxima en el intersticio de lubricación EHD.



2 Aseguramiento de rodamientos averiados

Si se requiere extraer de una máquina un rodamiento averiado, es imprescindible aclarar cuál es la causa del daño y cómo se puede evitar un nuevo fallo en el futuro. Si se desean obtener informaciones al respecto lo más fiables posible, es conveniente proceder de modo sistemático en el aseguramiento y el estudio del rodamiento. Lógicamente, muchos de los puntos que se enumeran a continuación se han de tener en cuenta también, por otra parte, al inspeccionar rodamientos que se desmontan dentro del programa de mantenimiento preventivo.

Es recomendable adoptar las medidas en el siguiente orden:

- Determinación de los datos de servicio, valoración de los diagramas de los dispositivos de control de rodamientos
- Toma de muestras de lubricante
- Comprobación del entorno del rodamiento en cuanto a las influencias externas y otros daños
- Dictamen del rodamiento en estado montado
- Marcaje de la posición de montaje
- Desmontaje del conjunto de rodamientos
- Identificación del rodamiento
- Control del asiento del rodamiento
- Dictamen del rodamiento completo
- Estudio de las distintas piezas del rodamiento o envío a FAG

Si el registro de los daños sigue un desarrollo inadecuado, se pueden perder de modo irreparable aspectos importantes del hallazgo de la causa. Los errores en el aseguramiento del rodamiento dañado también pueden falsear la imagen del daño o, por lo menos, dificultar notablemente la interpretación correcta de las características del daño.

2.1 Determinación de los datos de servicio

Al estudiar los daños sufridos por un rodamiento no sólo se comprueba el propio rodamiento, previamente las condiciones del entorno y de servicio también deben ser inspeccionadas (a ser posible, en combinación con un plano de montaje).

- Caso de empleo:
Máquina (aparato), lugar de montaje, tiempo de servicio alcanzado, número de máquinas del mismo tipo y número de fallos en dichas máquinas
- Estructura del apoyo:
Disposición de rodamiento fijo / rodamiento libre
Disposición flotante
Disposición con ajuste propio (elástico, rígido; con aros intermedios, por medio de arandelas de ajuste)
- Velocidad de rotación:
Uniforme, variable (aro interior y aro exterior)
Aceleración, deceleración
- Carga:
Axial, radial, combinada, par de vuelco constante, variable (grupo)
Vibración (aceleración, recorrido vibratorio)
Fuerzas centrífugas
Carga puntual, carga circunferencial (¿cuál es el aro que gira?)
- Piezas adyacentes:
Asiento del eje, asiento del alojamiento (ajustes)
Piezas de fijación (p. ej., tipo de tuercas de fijación, tornillos de dilatación, etc.)
- Condiciones ambientales:
Calentamientos externos, refrigeración
Medios especiales (p. ej., nitrógeno, vacío, radiación)
Vibraciones en estado de parada
Polvo, suciedad, humedad, medios corrosivos
Campos eléctricos o magnéticos
- Lubricación:
Lubricante, cantidad de lubricante
Aportación de lubricante
Periodos de relubricación
Fecha del último reengrase / del último cambio de aceite
- Obturación:
rozante, no rozante
- Historia del rodamiento dañado:
Primer montaje o rodamiento de repuesto
Modificaciones en el lugar de montaje / Máquina en el pasado
Frecuencia de fallos hasta el momento

Duración L10 determinada por cálculo
Duración de servicio alcanzada habitualmente

Particularidades durante el tiempo de servicio transcurrido

Reparaciones en otras partes de la máquina (medidas constructivas, trabajos de soldadura)

Problemas de servicio debido a otros elementos de la máquina (p. ej., daños en la obturación, pérdida de aceite)

Distancia y medio de transporte de la máquina o del rodamiento

Embalaje

- Valoración de los diagramas de dispositivos de control de rodamientos, en caso de que estos existan

2.2 Toma de muestras de lubricante y valoración de las mismas

A partir del lubricante se pueden obtener una gran diversidad de indicios en lo que respecta a la causas de los daños producidos en rodamientos. Sin embargo, es requisito indispensable que la toma de muestras se lleve a cabo correctamente (sólo en rodamientos abiertos); véase también DIN 51750, ASTM Standard D270-65 y 4057-81.

- Lubricación por grasa:
 - Documentación de la distribución y el color de la grasa en el entorno del rodamiento
 - Toma de muestras en diversos lugares del rodamiento y de su entorno, con el correspondiente marcado
- Lubricación por aceite:
 - Toma de muestras de la corriente de aceite en las proximidades del rodamiento o del centro del depósito de reserva
 - Toma de muestras durante el funcionamiento de la máquina o inmediatamente después, a fin de obtener una distribución representativa de materias extrañas
 - Las muestras no se deben tomar del fondo o directamente detrás del filtro (concentración de partículas errónea)

Aseguramiento de rodamientos averiados

- Aparte de las muestras de aceite, también se han de guardar e investigar residuos de filtro (indicios acerca de los antecedentes del daño)
- Generalidades
 - ¿Con qué frecuencia se realizaron anteriormente los reengrases o los cambios de aceite?; ¿cuándo se realizaron por última vez?
 - Examinar el aceite y la grasa para buscar fragmentos del rodamiento o de otras piezas constructivas
 - Para guardar las muestras se deben emplear recipientes limpios de materiales adecuados para este uso (p. ej., vidrio)
 - En el caso de las muestras de aceite, los recipientes deben disponer de suficiente espacio libre para una buena resuspensión de las muestras en el laboratorio
 - El análisis de las muestras puede realizarse en el establecimiento del cliente, en un laboratorio de lubricantes independiente o en FAG. Por lo general, tiene interés el grado de contaminación, así como el tipo de contaminación (arena, acero, partículas blandas, agua, líquido refrigerante) y un análisis de la capacidad lubricante (p. ej., envejecimiento, solidificación, color, coquización, contenido de aditivos). En la medida de lo posible, es conveniente entregar e investigar también una muestra de la grasa o del aceite no usados (en el caso de lubricantes desconocidos, influencias de la carga)

2.3 Comprobación del entorno del rodamiento

- ¿Podría existir rozamiento en algún lugar entre partes anexas y piezas del rodamiento?
- ¿Están dañadas también otras partes constructivas en las proximidades del rodamiento (daños consecuenciales o daños primarios)?
- Limpieza en el interior y en el exterior de las juntas (¿han entrado cuerpos extraños en el lugar de emplazamiento del rodamiento?)
- Fuerzas de aflojamiento de las piezas de fijación del rodamiento (¿ha sido sometido el rodamiento a deformaciones forzadas? ¿están flojas las fijaciones?)

2.4 Dictamen del rodamiento cuando está montado

- ¿Se pueden reconocer roturas o partes desprendidas?
- ¿Presentan daños las obturaciones, en especial deformaciones o endurecimientos?
- ¿Presenta el rodamiento deformaciones en las superficies visibles?
- ¿Se pueden reconocer rozaduras de piezas anexas?
- ¿Funciona el rodamiento con marcha suave o dura cuando está montado? (influencia del ajuste)

2.5 Desmontaje del rodamiento averiado

En el desmontaje de un rodamiento averiado hay que tener cuidado en principio de que la imagen del daño no resulte falseada. Si ello es inevitable, es conveniente identificar y anotar los daños debidos al desmontaje. Se debe seguir en la medida de lo posible el siguiente procedimiento:

- no dirigir las fuerzas de desmontaje a través de los cuerpos rodantes
- fuerzas de desmontaje elevadas indican eventualmente un funcionamiento alterado del rodamiento libre
- no deben abrirse rodamientos obturados
- no deben destruirse o dañarse partes sensibles al calor (lubricante, obturación, jaula) por calentamiento excesivo
- debe identificarse el rodamiento (lugar de montaje, dirección de montaje)

2.6 Control de los asientos

- Medida del eje y alojamiento (esfuerzos indebidos, asiento excesivamente flojo)
- Tolerancias de forma de los asientos (deformación oval)
- Rugosidad de los asientos (pérdida de sobremedida)
- Oxidación de contacto (en el caso de diferente distribución local, indicio de apoyo no uniforme, dirección de carga)

2.7 Dictamen del rodamiento completo

Para el dictamen, los rodamientos se deben presentar siempre sin limpiar, es decir, con restos de lubricante.

Se ha de comprobar:

- el estado general (limpieza del rodamiento y estado de las superficies de ajuste, es decir, huellas de montaje, oxidación de contacto, roturas del aro, precisión dimensional, huellas de desgaste, descoloraciones)
- estado de las arandelas de obturación y de las tapas de protección, fotografiado o descripción del lugar y el alcance de eventuales fugas de grasa
- Estado de la jaula
- Comprobación manual del giro (indicios de contaminación, deterioros o precargas)
- Medición del juego interno del rodamiento (desplazabilidad de los aros entre sí en dirección radial y axial), al efectuar esta operación, ¡cargar uniformemente y hacer girar el rodamiento!

2.8 Envío a FAG o dictamen de las diferentes piezas del rodamiento

En muchos casos, las principales posibles causas del fallo de un rodamiento pueden ser reconocidas ya in situ por el propio cliente o por un colaborador de FAG. Según la acentuación de determinadas características del daño hay que decidir a continuación si son necesarios otros estudios específicos. La forma de proceder al efectuar el estudio de las piezas individuales del rodamiento se describe detalladamente en la siguiente sección. Sin embargo, si sabemos de antemano que el estudio se realizará en FAG, para el envío de las piezas se ha de proceder de acuerdo con los siguientes pasos:

- A ser posible, el rodamiento no se debe desmontar ni limpiar. En ningún caso debe lavarse con un producto limpiador en frío o con gasolina (se perderían los datos indicativos de la lubricación, propensión a la corrosión).

Aseguramiento de rodamientos averiados · Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

- Se debe evitar la contaminación tras el desmontaje. A ser posible, envolver los rodamientos individualmente en una hoja plástica limpia, pues el papel o los trapos pueden absorber la grasa.
- Debe elegirse un embalaje suficientemente sólido y hermético, a fin de que no se produzcan daños durante el transporte.

3 Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

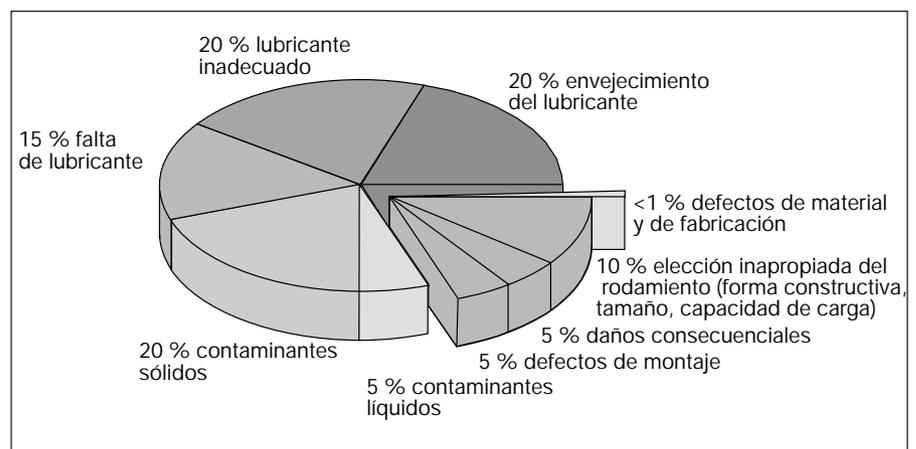
Por daños del rodamiento debe entenderse no solamente el fallo completo de un rodamiento, sino también una disminución del rendimiento del mismo. En este sentido, también hay que tener en cuenta que las causas de perturbaciones en la marcha de un rodamiento se pueden reconocer con una seguridad tanto mayor cuanto más pronto se desmonta el rodamiento sospechoso.

Un rodamiento sólo puede funcionar satisfactoriamente si están correctamente armonizadas entre sí las condiciones de servicio y del entorno y los componentes del apoyo (rodamiento, piezas anexas, lubricación, obturación). Las causas de avería en un rodamiento no se deben buscar tan sólo en el propio rodamiento. Los daños debidos a defectos de material o de fabricación del rodamiento se producen en raras ocasiones. Antes de investigar los daños de un rodamiento a través de sus diferentes componentes, es conveniente que las personas encargadas de la valoración adquieran una visión de conjunto de posibles causas de deterioro con ayuda de los datos determinados según el capítulo

2. Es frecuente que a partir de las condiciones de servicio o de características externas se obtengan ya indicios de las causas de los daños. En la tabla de la figura 12 se relacionan las características de daños más importantes con las causas típicas de daños en los rodamientos.

Con toda seguridad, este resumen no puede abarcar todas las posibles averías; sólo proporciona una visión de conjunto aproximada. Además, hay que tener en cuenta que existe toda una serie de cuadros de averías que aparecen exclusivamente o por lo menos preferentemente en determinados tipos de rodamientos o bajo condiciones de empleo especiales. En muchos casos también se pueden observar al mismo tiempo varias señales características de deterioro en un rodamiento. En tal caso, suele ser difícil determinar la causa primaria del fallo. Entonces sólo suele servir de ayuda un esclarecimiento sistemático de diversas hipótesis de daños. Para ello es conveniente el modo sistemático de proceder que se describe a continuación.

11: Causas de fallos en rodamientos (fuente: antriebstechnik 18 (1979) nº 3, 71-74). Sólo un 0,35 % de todos los rodamientos fallan de forma prematura.



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

12: Datos indicativos de daños en rodamientos y sus causas

| Característica | Zonas dañadas del rodamiento | | | | | Causas típicas de daños en los rodamientos | | | | | |
|---|------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------|-----------|---|-------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| | Superficies de asiento | Superficies de rodadura | Pestañas y caras de los rodillos | Jaula | Obtención | Montaje | | | | | |
| | | | | | | Proced. de montaje o herramientas incorrectos | Falta de limpieza | Ajuste forzado precarga elevada | Ajuste flojo precarga baja | Mal apoyo de los aros | Error de alineación o flexión de eje |
| a) Comportamiento de servicio irregular | | | | | | | | | | | |
| Funcionamiento irregular | | | | | | ■ | ■ | | ■ | | |
| Ruido inhabitual | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Comportamiento alterado de la temperatura | | | | | | | | ■ | | | ■ |
| b) Aspecto de los componentes del rodamiento desmontado | | | | | | | | | | | |
| 1 Impresiones de cuerpos extraños | | ■ | | | | | ■ | | | | |
| 2 Daños causados por fatiga | | ■ | | | | ■ | ■ | ■ | | ■ | ■ |
| 3 Marcas producidas en las paradas | | ■ | | | | | | | | | |
| 4 Cráteres de fusión y estrías | | ■ | | | | | | | | | |
| 5 Daños por deslizamiento | | ■ | | | | | | | ■ | | |
| 6 Impresiones producidas por los cuerpos rodantes Estrías longitudinales | | ■ | ■ | | | ■ | | | | | |
| 7 Gripado | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | |
| 8 Daños por desgaste | | ■ | ■ | ■ | ■ | | ■ | | | | |
| 9 Daños por corrosión | | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | |
| 10 Daños por calentamiento | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | ■ | | | |
| 11 Roturas | ■ | ■ | ■ | ■ | | ■ | | ■ | | ■ | |
| 12 Daños debidos a oxidación de contacto (falso Brinelling) | ■ | | | | | | | | ■ | ■ | |

| Característica | Causas típicas de daños en los rodamientos | | | | | | | | | |
|---|--|-------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------|---------------|-------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|
| | Solicitaciones durante el servicio | | | Influencias del entorno | | | | Lubricación | | |
| | Carga excesiva o insuficiente | Vibraciones | Velocidades de rotación elevadas | Polvo, suciedad | Medios agresivos, agua | Calor externo | Paso de corriente | Lubricante inadecuado | Falta de lubricante | Lubricación excesiva |
| a) Comportamiento de servicio irregular | | | | | | | | | | |
| Funcionamiento irregular | | ■ | | ■ | ■ | | ■ | ■ | | |
| Ruido inhabitual | ■ | ■ | | ■ | ■ | | ■ | ■ | ■ | |
| Comportamiento alterado de la temperatura | ■ | | ■ | | | ■ | | ■ | ■ | ■ |
| b) Aspecto de los componentes del rodamiento desmontado | | | | | | | | | | |
| 1 Impresiones de cuerpos extraños | | | | ■ | | | | | | |
| 2 Daños causados por fatiga | ■ | | | ■ | | ■ | | ■ | ■ | |
| 3 Marcas producidas en las paradas | | ■ | | | | | | | | |
| 4 Cráteres de fusión y estrías | | | | | | | ■ | | | |
| 5 Daños por deslizamiento | ■ | | | | | | | | ■ | |
| 6 Impresiones producidas por los cuerpos rodantes Estrías longitudinales | ■ | | | | | | | | | |
| 7 Gripado | ■ | | ■ | | | | | ■ | ■ | |
| 8 Daños por desgaste | | | | ■ | | | | ■ | ■ | |
| 9 Daños por corrosión | | | | | ■ | | | ■ | | |
| 10 Daños por calentamiento | | | ■ | | | ■ | | ■ | ■ | ■ |
| 11 Roturas | | | | | | | | | | |
| 12 Daños debidos a oxidación de contacto (falso Brinelling) | | ■ | | | | | | | | |

Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Medidas preparatorias

3.1 Medidas preparatorias

3.1.1 Identificación de las distintas piezas

- Cuando hay varios rodamientos procedentes de idénticas disposiciones de apoyo, se numeran todas las piezas del rodamiento y se determina su disposición en el apoyo
- Se marca la posición lateral de las partes del rodamiento entre sí y en relación con su posición de montaje.
- Se marca la dirección radial de montaje de los aros en relación con fuerzas exteriores.

3.1.2 Mediciones realizadas en el rodamiento completo

- Verificación de ruidos
- Control del juego radial y axial
- Control de saltos radiales y axiales
- Comprobación del par de rozamiento

3.1.3 Desmontaje del rodamiento en sus diferentes componentes

- Eventualmente, se determinan las cantidades de grasa si se ha reconocido pérdida de la misma en rodamientos obturados.
- En el caso de rodamientos obturados, se retiran cuidadosamente y con las menores deformaciones posibles las tapas de protección o de obturación.
- Se valora la distribución de la grasa en el rodamiento
- Se toma una muestra de grasa; en caso de que el aspecto del lubricante sea poco uniforme, se deben tomar varias muestras
- Si es imposible un desmontaje no destructivo, es conveniente que se destruyan las piezas que se supone no han influido sobre la producción del deterioro (p. ej., en el caso de un rodamiento de rodillos cónicos, se corta el reborde de retención perteneciente al menor diámetro del cono del aro interior).
- En caso de que el proceso de desmontaje ocasione forzosamente daños, es conveniente identificar y anotar dichos daños.

3.1.4 Dictamen de los componentes del rodamiento

En primer lugar, es preciso adquirir visualmente, sin emplear medios auxiliares, una primera impresión global sobre las características fundamentales de servicio y montaje. En la mayor parte de los rodamientos es también conveniente o necesaria una valoración microscópica de las piezas del rodamiento.

En la mayoría de los casos es conveniente el siguiente modo de proceder para el examen de las piezas del rodamiento:

Valoración de

- las superficies de asiento (superficies de apoyo axiales, agujero del aro interior, diámetro exterior del aro exterior)
- Caminos de rodadura
- Bordes
- Superficies de asiento de la obturación y superficies de contacto.
- Elementos rodantes (en los rodillos, superficies frontales y de rodadura)
- Jaulas
- Obturaciones

De vez en cuando, pueden ser también necesarias para el esclarecimiento de la causa del deterioro, investigaciones de mayor alcance, como p. ej. análisis del lubricante, mediciones, investigaciones electromicroscópicas, etc. Para tales casos, están a su disposición los laboratorios de investigación y desarrollo de FAG (véase a este respecto el capítulo 4)

Con frecuencia hay que decidir si se puede seguir empleando o se ha de sustituir un rodamiento desgastado por el uso. Si se descubre un daño evidente, no existe lugar a dudas sobre la forma de proceder a continuación. A pesar de todo, el dictamen del rodamiento suele proporcionar datos indicativos sobre el estado de servicio. Si se reconocen características inhabituales y sus causas, frecuentemente se pueden evitar daños mayores.

Los siguientes apartados contienen descripciones de las características, su importancia o sus causas y, siempre que sea interesante, medidas para evitarlas.

Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Estado de las superficies de asiento

3.2 El estado de las superficies de asiento

A partir del estado de las superficies de asiento se puede llegar a diversas conclusiones sobre la bondad del apoyo de los aros del rodamiento sobre el eje o en el alojamiento. Los movimientos de los aros con respecto a las superficies de asiento causan ruidos que con frecuencia pueden resultar molestos. Pero estos movimientos también pueden dar lugar a oxidación en el ajuste y desgaste. Debido a ello se produce una contaminación del lubricante por las partículas originadas en la corrosión y en la fricción. Además, el apoyo de los aros empeora progresivamente, y la oxidación en el ajuste puede causar dificultades en el desmontaje. A continuación se indican algunos ejemplos a este respecto.

3.2.1 Oxidación de contacto - Oxidación en el ajuste

Características:

Manchas marrones-negras en las superficies de asiento, ocasionalmente también abrasión de color marrón en las proximidades del rodamiento o en el lubricante. Desgaste en las superficies de ajuste (agujero, diámetro del aro exterior), posibilidad de rotura en las piezas con movimiento de rotación (sobre todo, ejes), posible perturbación de la función de rodamiento libre en las piezas estacionarias (sobre todo, alojamientos); figura 13. De esta oxidación en el ajuste se puede deducir con frecuencia la posición y el tamaño de la zona de carga, figura 14, y también un giro relativo de los aros.

Causas:

- Micromovimientos entre las piezas ajustadas en el caso de ajustes demasiado flojos en relación con las fuerzas que actúan, pero sin giro relativo de los aros.
- Alteraciones de la forma de las superficies de ajuste
- Flexión del eje, deformación del alojamiento
- Función de rodamiento libre en el aro con carga circunferencial

Medidas correctoras:

- Prever la función de rodamiento libre en el aro con carga puntual

- Emplear ajustes de rodamientos lo más fuertes posibles
- Hacer el eje (alojamiento) más rígido a la flexión
- Recubrir los asientos de los rodamientos
- En caso de temperaturas de servicio elevadas, deben emplearse aros dimensionalmente estabilizados (con ello se evita la pérdida de ajuste por expansión de los aros a consecuencia de variaciones en la estructura del acero)
- Mejorar la redondez de las superficies de asiento
- Comprobar, y eventualmente mejorar, la calidad superficial de las superficies de asiento

13: Oxidación de contacto en el agujero del aro interior de un rodamiento de rodillos cilíndricos con asiento demasiado flojo



14: La oxidación en el ajuste hace visible el tamaño de la zona de carga en el aro exterior estacionario.



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Estado de las superficies de asiento

3.2.2 Huellas de gripado o desgaste por deslizamiento

Características:

Soldaduras en frío en las superficies de ajuste (orificio del aro interior, diámetro exterior del aro exterior) y superficies de contacto axiales o, en el caso de buena rugosidad de contacto, también superficies de contacto brillantes, véanse figuras 15, 16.

Desgaste de las superficies de ajuste y superficies frontales, figura 17; eventualmente, desaparición de la precarga o aumento del juego interno.

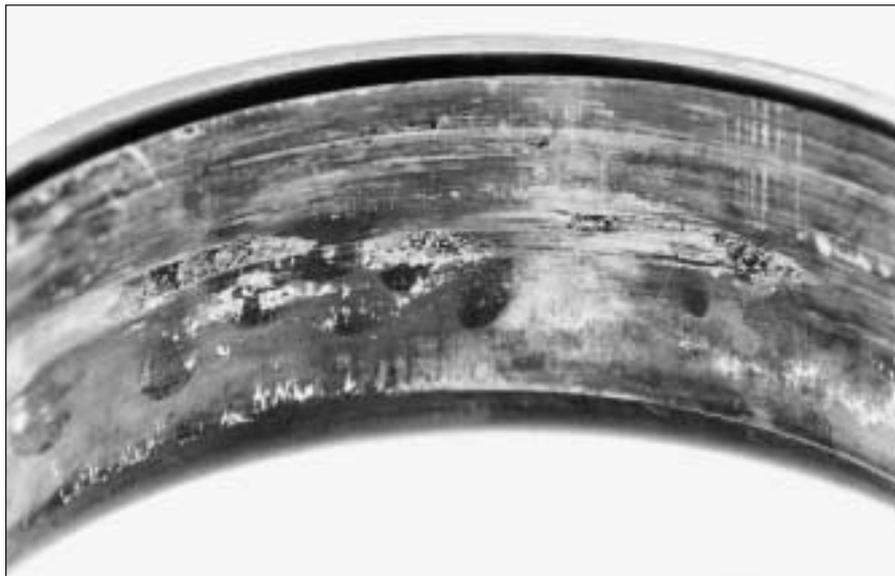
Causas:

- Movimientos de giro entre el aro y el eje/alojamiento en ajustes libres bajo carga circunferencial; también en caso de carga estática bajo desequilibrios
- Fijación axial de los aros insuficiente
- Dificultad de desplazamiento del rodamiento libre

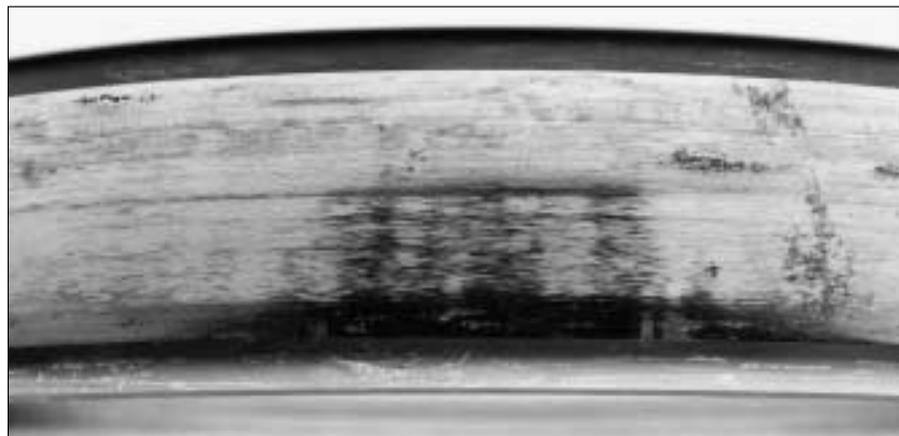
Medidas correctoras:

- Emplear ajustes de rodamiento lo más fuertes posible
- Aumentar las superficies de contacto axiales
- Asegurar la fijación axial
- Mantener secas las superficies de ajuste
- Mejorar la función de rodamiento libre

16: Huellas de gripado en el agujero del aro interior como consecuencia del giro relativo del aro interior sobre el eje



15: Huellas de gripado en diámetro exterior a consecuencia del giro relativo del aro exterior en el alojamiento



17: Estrías circunferenciales y soldaduras en frío en la superficie frontal del aro interior como consecuencia del giro relativo del aro interior sobre el eje



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Estado de las superficies de asiento

3.2.3 Apoyo no uniforme de los aros del rodamiento

Características:

Huellas de asiento no situadas en la zona de carga esperada.

Estructura de acabado de las superficies de ajuste desgastada en algunas zonas y mantenida todavía por completo en otras zonas; véanse figuras 18, 19. Como consecuencia, daños por fatiga y roturas debidos a una distribución no uniforme de la carga y flexión de los aros. En el caso de apoyo axial insuficiente de aros interiores de rodamientos con rodillos cónicos, también roturas del borde, figura 20, y fenómenos de asentamiento en el caso de superficies de contacto demasiado pequeñas.

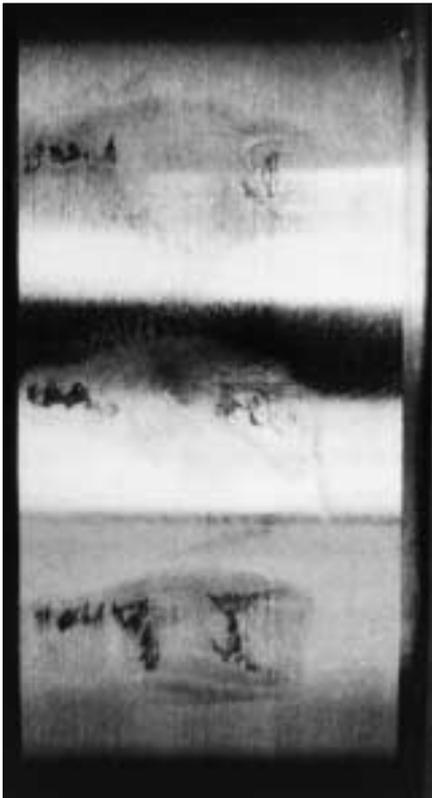
Causas:

- Diseño inadecuado
- Acabado poco preciso

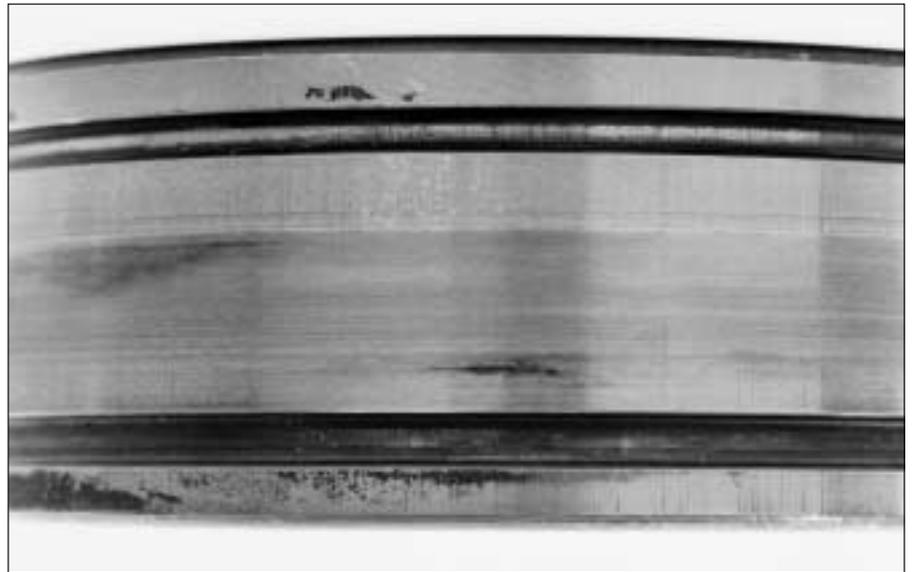
Medidas correctoras:

- Modificar constructivamente las partes anexas, teniendo cuidado de que la rigidez del alojamiento sea uniforme; eventualmente, emplear también otros rodamientos
- Comprobar la fabricación de las partes anexas

18: Diámetro exterior del aro exterior, oxidación de ajuste en "puntos duros" (p. ej., nervaduras) en el alojamiento



19: Diámetro exterior del aro exterior, apoyado sólo en la mitad de su anchura



20: Rotura en el borde del aro interior de un rodamiento de rodillos cónicos a consecuencia de un apoyo axial insuficiente de la superficie frontal



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Estado de las superficies de asiento

3.2.4 Huellas de rozamiento laterales

Características:

Huellas de arañazos o desgaste en las superficies frontales de los aros de rodamientos o de las obturaciones, véanse figuras 21, 22.

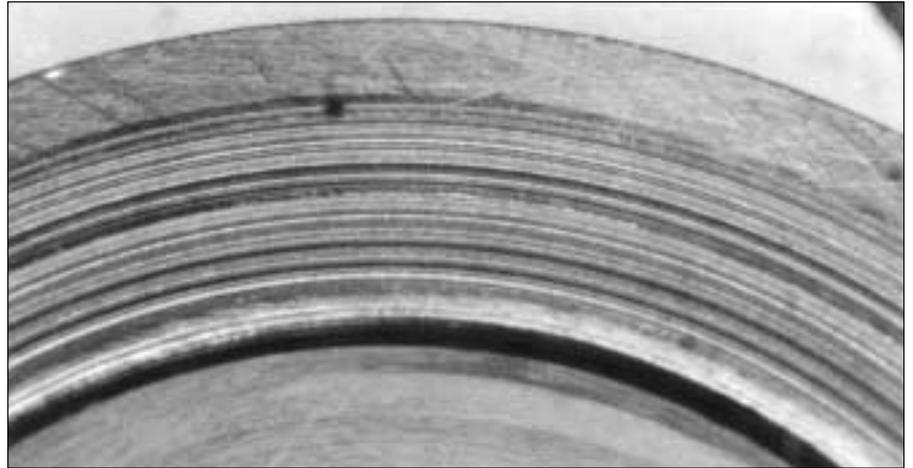
Causas:

- Fijación insuficiente de los rodamientos en el alojamiento o sobre el eje
- Gran acumulación de contaminación externa en el caso de un estrecho intresticio entre el rodamiento y la parte anexa
- Partes anexas flojas
- Juego axial interno excesivo

Medidas correctoras:

- Fijar las piezas en la forma debida
- Garantizar la limpieza del lubricante
- Comprobar y eventualmente restringir el juego axial interno

21: Estrías circulares y soldaduras en frío en la superficie frontal por rozamiento de una parte anexa



22: Deterioro de la obturación por rozamiento lateral



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

3.3 Huellas de rodadura características

3.3.1 Aparición e importancia de las huellas de rodadura

Independientemente de la aparición de daños, en todo rodamiento gastado por la marcha se pueden reconocer variaciones de las superficies de contacto entre los aros y los cuerpos rodantes, que se denominan huellas de rodadura. Estas huellas se forman por rugosidad o alisamiento de la estructura superficial original de fábrica. También se caracterizan con frecuencia por impresiones de partículas externas microscópicas sometidas a rodadura o por descoloraciones. Por lo tanto, de las huellas de rodadura se puede obtener información sobre la bondad de la lubricación, la limpieza del lubricante y la dirección de la carga, así como sobre la distribución de la carga en el rodamiento.

3.3.1.1 Huellas de rodadura normales

Los elementos rodantes, sometidos a movimiento giratorio y carga, dejan tras de sí huellas sobre las pistas de rodadura. Estas huellas suelen tener un aspecto claro si la película de lubricante tiene una buena capacidad de separación. Sin embargo, la forma de manifestación individual de las huellas de rodadura depende en gran medida de la iluminación de la superficie. Pero la estructura del acabado todavía debe ser reconocible en gran medida si se examina con una lupa o al microscopio (¡compárese con zonas no gastadas por la marcha junto al borde del camino de rodadura!). También se pueden considerar inevitables impresiones aisladas de pequeñas partículas extrañas. En el caso de una lubricación especialmente buena, son los únicos datos indicativos de la situación de las zonas de carga en el rodamiento, figura 23. En muchos casos, también se producen descoloraciones de los caminos de rodadura o de los cuerpos rodantes a temperaturas superiores entorno a los 80 °C y

superiores. Se forman por reacciones químicas del acero con el lubricante o sus aditivos, y no influyen negativamente sobre la duración de servicio del rodamiento. Muy al contrario, esta característica indica una efectiva protección al desgaste de un aditivo. En la mayoría de los casos, se originan matices parduscos-azulados. Sin embargo, no podemos sacar conclusiones obvias de la temperatura de servicio y la coloración resultante. Condiciones de servicio muy similares han producido en los elementos rodantes tonos de color muy diferentes.

Esta descoloración del aceite no debe confundirse con la coloración de templado que presentan en raras ocasiones los rodamientos averiados como resultado de elevadísimas temperaturas, ver sección 3.3.5.

En ocasiones las bolas presentan huellas de rodadura en forma de líneas equatoriales. Estas aparecen en rodamientos de bolas de contacto angular cuando las bolas siempre tienen el mismo eje de rotación y no afectan de forma significativa a la vida del rodamiento, fig. 24.

23: Huella de rodadura normal; la estructura superficial todavía es visible, y sólo se encuentran algunas impresiones aisladas producidas por cuerpos extraños



24: Bola con franja de trazado equatorial

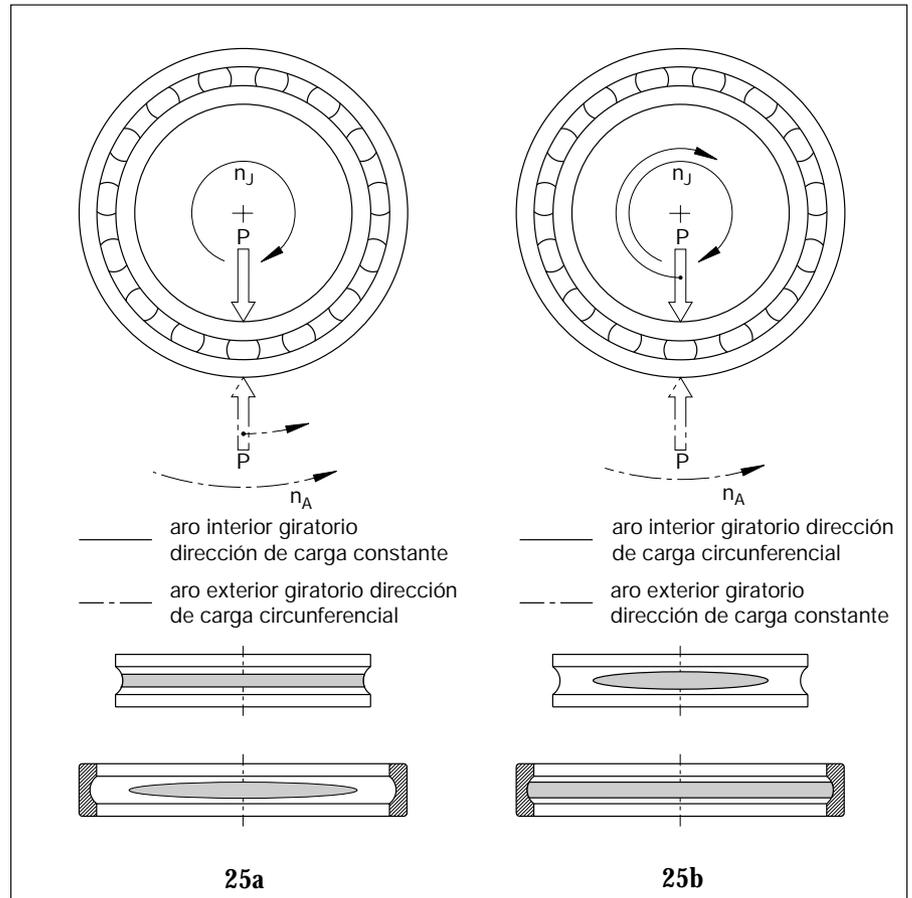


Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

25: Carga radial en un rodamiento radial, p. ej. de un rodamiento rígido de bolas. En el caso de carga puntual y alojamiento suficientemente rígido, la huella de rodadura en el aro estacionario es inferior a la mitad del perímetro del camino de rodadura, siempre que no se haya producido ninguna precarga radial. En caso de carga circunferencial, la huella de rodadura se extiende a lo largo de todo el perímetro

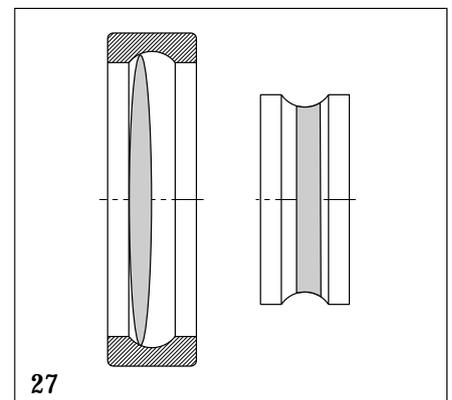
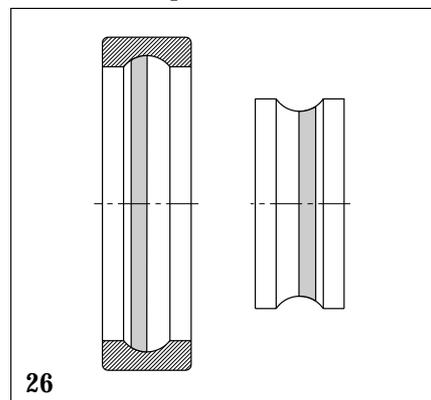
- a: Carga puntual para el aro exterior, carga circunferencial para el aro interior
- b: Carga puntual para el aro interior, carga circunferencial para el aro exterior



La disposición de las huellas de rodadura depende de la dirección de la carga externa y de las condiciones de rotación (carga puntual o carga circunferencial, carga axial, carga combinada), véanse figuras 25 a 27. Una comparación “teórica-real” proporciona también en este caso importantes datos indicativos de condiciones de carga inesperadas, por ejemplo de una función de rodamiento libre alterada. En el caso de carga puramente radial, la aparición de huellas de rodadura en dirección circunferencial sobre el aro vertical depende en gran medida de la magnitud de la carga, del juego interno del rodamiento y de la rigidez de las partes anexas. Cuanto mayor es la carga, cuanto menor es el juego interno del rodamiento y cuanto menos rígido es el alojamiento, más extensa se vuelve la zona de carga, y por lo tanto, también la huella de rodadura.

26: Carga axial en un rodamiento radial, p. ej. un rodamiento rígido de bolas. Las huellas de rodadura se extienden por la parte central exterior a lo largo de todo el perímetro del camino de rodadura de los aros interior y exterior.

27: Carga combinada radial-axial en un rodamiento rígido de bolas. En el aro interior (carga circunferencial) se forma una huella de rodadura de anchura uniforme a lo largo de todo el perímetro del camino de rodadura. En el aro exterior (carga puntual) la huella de rodadura es más ancha en la zona sometida a carga radial que en el resto del perímetro



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

3.3.1.2 Huellas de rodadura poco habituales

Cuáles son la huellas de rodadura normales y cuáles son inhabituales es algo que depende en gran medida de cada caso de montaje. Así, por ejemplo, los rodamientos podrían tener huellas de rodadura completamente normales, que permitan llegar a la conclusión de la existencia de una carga radial; sin embargo, para un apoyo que deba rodar sometido a precarga axial, esto sería un dato indicativo de un montaje defectuoso del rodamiento. Con esto se pone claramente de manifiesto que para la valoración de las huellas de rodadura deben conocerse las condiciones de empleo de los rodamientos. De todos modos, algunas características fundamentales se pueden evaluar siempre con ayuda de las huellas de rodadura.

- Huellas de rodadura en caso de lubricación inadecuada

Características:

La forma de manifestación visual de las huellas de rodadura y la configuración fina de la superficie, es decir, la rugosidad, permiten llegar a importantes conclusiones sobre la calidad de la lubricación. En el caso de una película de lubricante no separadora, bajo carga moderada, se forman huellas de rodadura rugosas de aspecto mate en el camino de rodadura. La influencia de la superficie es tanto más intensa cuanto más fina es la película lubricante; en este caso se habla de mala separación superficial, figura 28.

En el caso de carga específica elevada en las superficies de contacto se originan huellas de rodadura brillantes, pulidas por la presión, a menudo relucientes como un espejo, que están muy claramente delimitadas con respecto al camino de rodadura no utilizado, figura 29.

Causas:

- Cantidad de lubricante insuficiente disponible en el rodamiento
- El lubricante tiene una viscosidad insuficiente a la temperatura y la velocidad de rotación de servicio (véase catálogo "Rodamientos FAG", cálculo de vida ampliado)

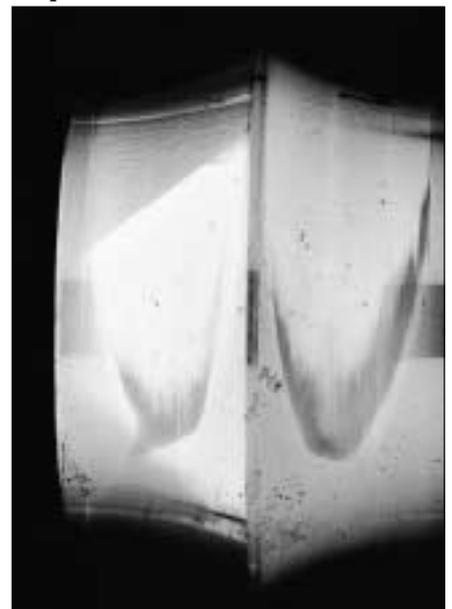
Medidas correctoras:

- Mejorar la aportación de lubricante
- Adaptar la viscosidad del lubricante a las condiciones de servicio
- Emplear lubricante con aditivos de comprobada eficacia en rodamientos
- Utilizar componentes del rodamiento con recubrimiento superficial

28: Huella de rodadura con desgaste superficial



29: Huella de rodadura pulida por la presión



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

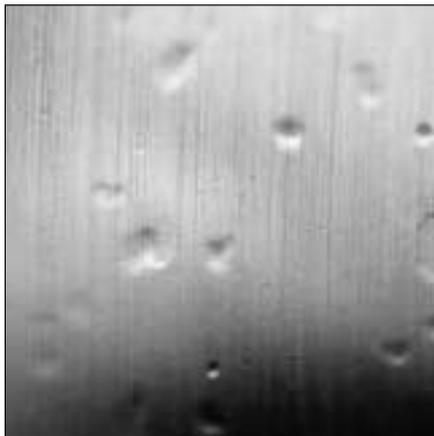
- **Huellas de rodadura en caso de contaminación en el rodamiento o en el lubricante**

Ante todo, hay que distinguir entre impurezas sólidas y líquidas.

Características en el caso de impurezas sólidas:

Si existen materias sólidas en el camino de rodadura sobre las que pasan los elementos rodantes, éstas dejan indentaciones. Al examinar las huellas de rodadura con ayuda del microscopio, de acuerdo con las indentaciones se puede distinguir entre partículas de materiales blandos, de acero templado y de minerales duros, véanse figuras 30, 31, 32. Para la vida resultan críticos los cuerpos extraños duros especialmente grandes. Este aspecto se tratará más a fondo al describir los daños por fatiga; véase también “Fatiga a consecuencia de la rodadura sobre cuerpos extraños” del subapartado 3.3.2.1. Un gran número de cuerpos extraños duros de pequeño tamaño da lugar a rugosidades como las mostradas en la figura 28, y acelera el desgaste abrasivo.

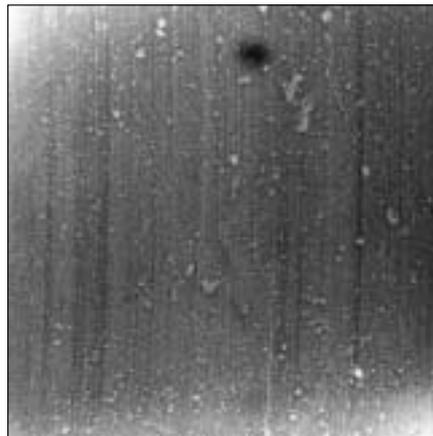
30: Indentaciones de cuerpos extraños blandos



Características en el caso de impurezas líquidas:

Entre las impurezas líquidas del lubricante aparece con frecuencia el agua. En ciertas cantidades pequeñas, puede ser absorbida por el lubricante, aunque empeora el efecto lubricante y provoca con frecuencia huellas de rodadura como las de la figura 29. En caso de cantidades relativamente grandes de humedad en el rodamiento se forman huellas de aspecto mate en el camino de rodadura y, a continuación, se produce corrosión, o, en el caso de carga elevada, también huellas de rodadura pulidas por la presión con daños por fatiga; véase también “Fatiga a consecuencia de una mala lubricación” en el subapartado 3.3.2.1.

31: Indentaciones de cuerpos extraños de acero templado



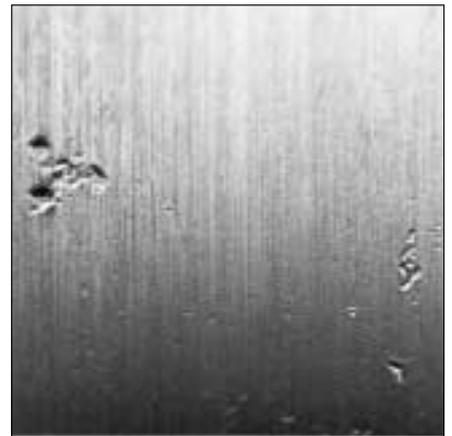
Causas:

- Obturación insuficiente
- Falta de limpieza en las condiciones de montaje
- Residuos de fabricación, como p. ej. arena de moldes
- Diferencias de temperatura (formación de agua de condensación)
- Aceite poco limpio

Medidas correctoras:

- Mejorar constructivamente la obturación
- Montaje más limpio y piezas constructivas bien lavadas, pintar en caso necesario
- Lavar a fondo todo el sistema de aceite antes de la puesta en servicio (antes del primer giro de los rodamientos)

32: Indentaciones de cuerpos extraños minerales duros



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

• Huellas de rodadura en el caso de precarga radial

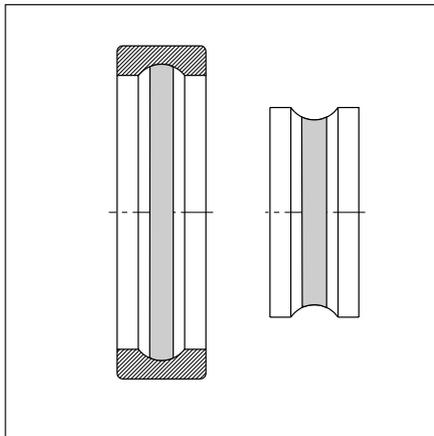
Características:

En el caso de precarga radial se forman en los dos aros huellas de rodadura a todo lo largo del camino de rodadura, figura 33. En el caso extremo, puede originarse como consecuencia un deterioro por re- calentamiento, véase apartado 3.3.5.

Causas:

- Excesivo ajuste de interferencia en el eje/alojamiento
- Diferencias de temperatura excesivamente altas entre los aros interior y exterior
- Insuficiente juego interno del rodamiento

33: Rodamiento rígido de bolas con precarga indebida. Las huellas de rodadura se extienden por todo el perímetro del aro, incluso en el aro con carga puntual.



• Huellas de rodadura en el caso de deformación oval

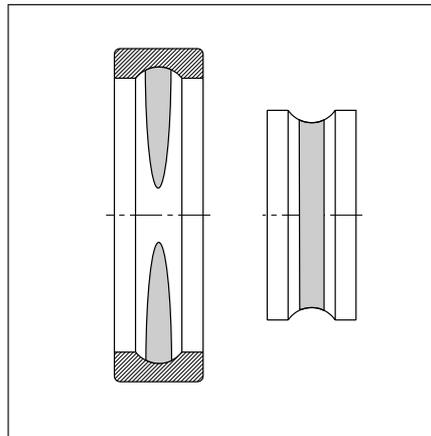
Características:

En el perímetro del aro estacionario se forman varias zonas de huellas de rodadura separadas entre sí, figura 34.

Causas:

- Falta de redondez en el alojamiento o el eje, p. ej., también debido a diferentes rigideces a lo largo del perímetro en la mecanización o a agujeros de rosca en las proximidades de los asientos de rodamientos
- Distintas rigideces del alojamiento en dirección circunferencial, a la vez que una cobertura elevada con el aro exterior
- Almacenamiento de rodamientos de secciones delgadas en posición vertical

34: Precarga provocada por ovalización en un rodamiento rígido de bolas. En el aro exterior, sometido a ovalización (carga puntual), se han formado zonas de carga radial opuestas.



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

• Huellas de rodadura en el caso de precarga axial

Características:

En el caso de apoyo fijo/libre, sólo deben formarse huellas de rodadura pronunciadas en el rodamiento fijo, como se representa en la figura 35b, como las que se forman en el caso de carga axial (figura 26). En el rodamiento libre debe ser perceptible a lo sumo una proporción reducida (mejor ninguna) de carga axial.

Causas:

- Función de rodamiento libre alterada (ajuste incorrecto, dilatación radial por calor, desalineación, oxidación en el ajuste)
- Dilatación axial por temperatura inesperadamente elevada

Medidas correctoras:

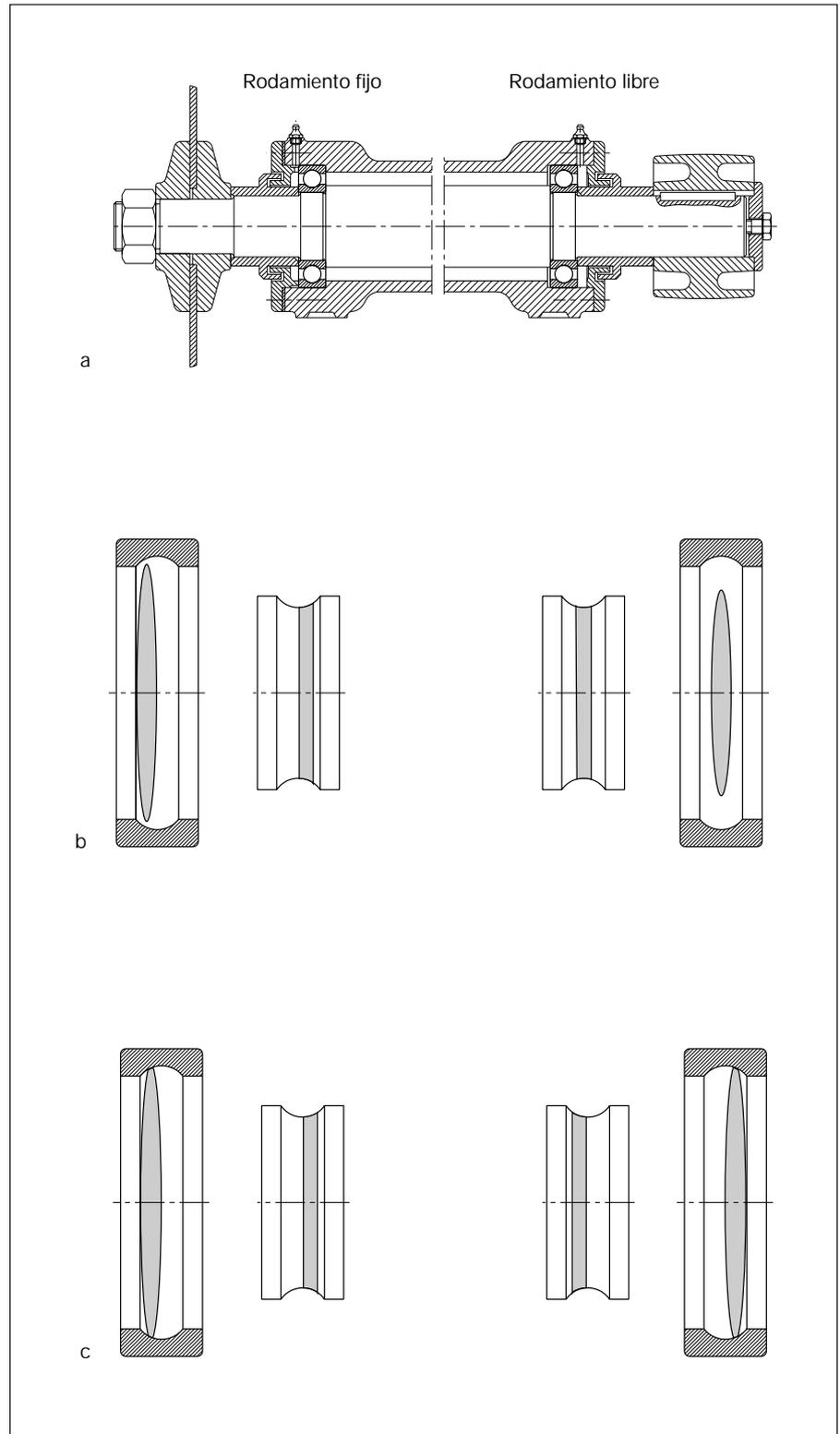
- Comprobar el ajuste y la precisión de forma de las partes anexas
- Modificar las condiciones de montaje y de servicio
- Emplear rodamientos con libertad axial: rodamientos de rodillos cilíndricos N, NU, NJ.

35: Apoyo fijo-libre con dos rodamientos rígidos de bolas

a: El rodamiento rígido de bolas del lado de trabajo está conformado como rodamiento fijo; el del lado de accionamiento, como rodamiento libre.

b: Huellas de rodadura en los rodamientos bajo correctas condiciones de servicio. El rodamiento fijo tiene las características de un rodamiento sometido a carga predominantemente radial.

c: Huellas de rodadura en el caso de rodamientos sometidos a precarga axial (aro exterior del rodamiento libre no se ha movido). Cada rodamiento presenta las características de una carga combinada. La precarga axial se pone claramente de manifiesto por la posición de las huellas de rodadura de ambos rodamientos.



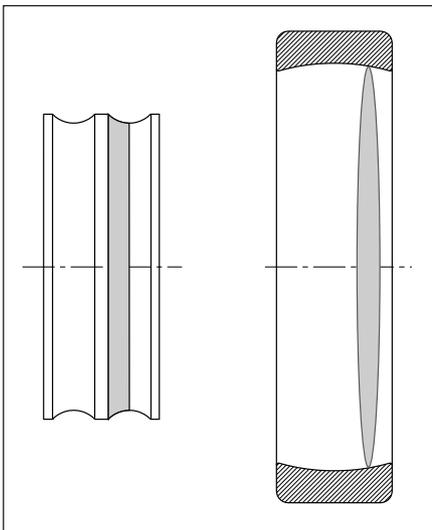
Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

36: Exfoliación producida por precarga axial en el camino de rodadura del aro exterior de un rodamiento oscilante de bolas



37: Configuración de las huellas de rodadura en el caso de un rodamiento oscilante de bolas con aro interior giratorio, cargado radialmente y sometido a precarga axial



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

• Huellas de rodadura en el caso de arriostrado oblicuo

Características:

En el caso de rodamientos de bolas, la huella de rodadura del aro estacionario no discurre perpendicularmente, sino oblicuamente con respecto a la dirección axial, véanse figuras 38 y 39. En los rodamientos de rodillos en condiciones de desalineación, la huella de rodadura es más pronunciada en un camino de rodadura que en el otro, figura 40

Causas:

- Flexión del eje
- Desalineación de los soportes
- La superficie de contacto axial no se encuentra en ángulo correcto con respecto al eje geométrico del rodamiento
- Durante el montaje ha existido suciedad entre las superficies de contacto y los aros de los rodamientos
- Excesivo juego interno del rodamiento en combinación con pares de vuelco

Medidas correctoras:

- Prestar atención a las instrucciones de montaje en lo referente a la desalineación admisible; véase catálogo FAG
- Tener cuidado de que el montaje se realice en condiciones de máxima limpieza
- Fijar un juego interno adecuado

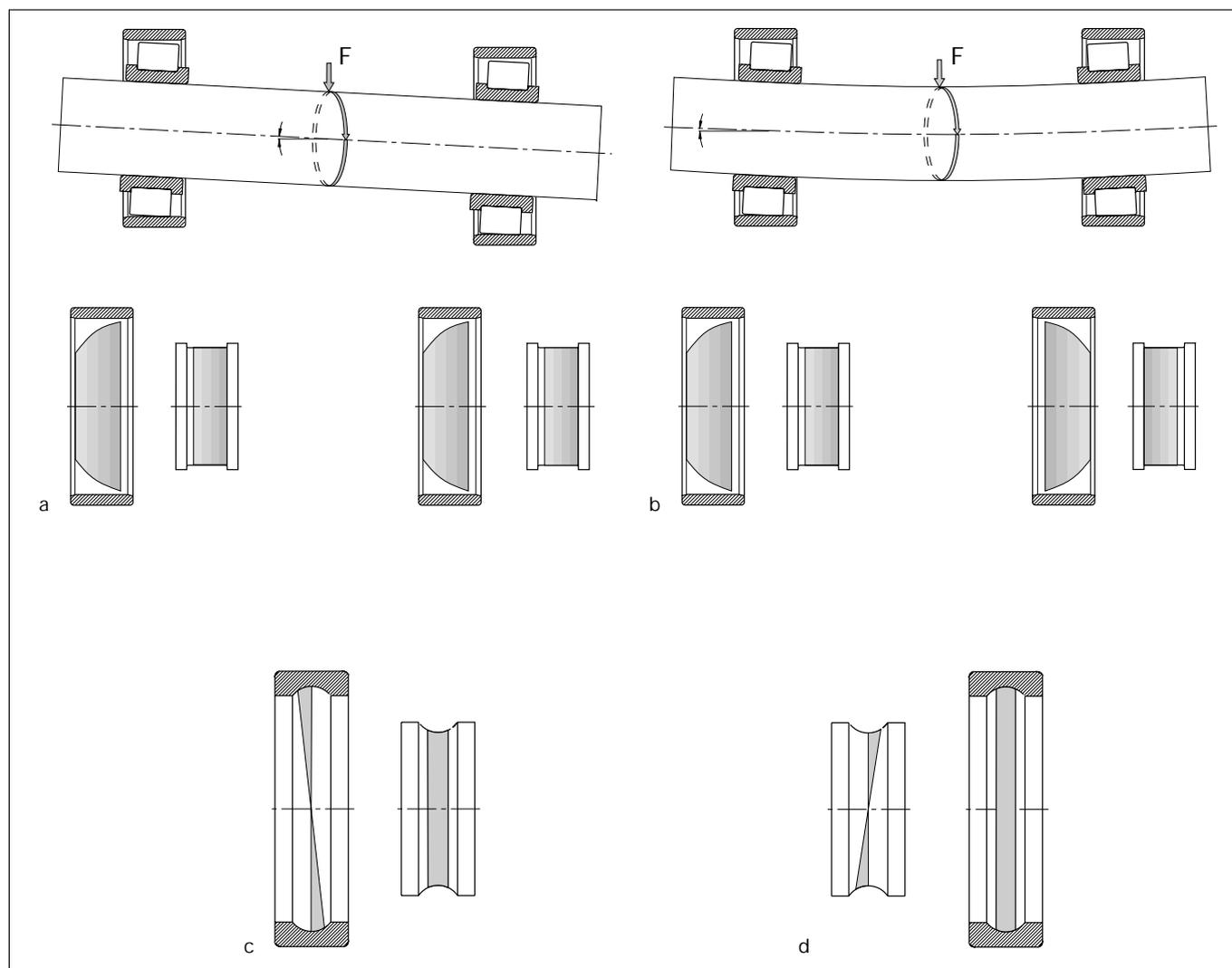
38: Rodamientos sometidos a arriostrado oblicuo

a: Ladeo de los aros interiores con respecto a los aros exteriores en el caso de desalineación de los asientos de los alojamientos

b: Ladeo de los aros de rodadura entre sí en caso de flexión del eje

c: Huellas de rodadura en el caso de un rodamiento rígido de bolas sometido a arriostrado oblicuo, con aro interior giratorio

d: Huellas de rodadura en el caso de un rodamiento rígido de bolas sometido a arriostrado oblicuo, con aro exterior giratorio



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características



39: Huella de rodadura oblicua del aro interior de un rodamiento rígido de bolas



40: Huella de rodadura ladeada en un rodamiento de rodillos cónicos

3.3.2 Indentaciones en los caminos de rodadura y en las superficies de los elementos rodantes

En las partes de rodamientos dañadas se encuentran con frecuencia impresiones aisladas en las superficies de contacto que pueden obedecer a las más diversas causas. Como por lo general aparecen en gran número con una distribución superficial uniforme, las indentaciones originadas por la rodadura sobre cuerpos extraños han sido ya tratadas junto con la valoración de las huellas de rodadura (apartado 3.3.1). Aquí se van a comentar principalmente los fenómenos que se presentan en el aro localmente.

3.3.2.1 Roturas

El material de los caminos de rodadura y los elementos rodantes está sometido de forma continuada a una sollicitación pulsante. Esta sollicitación da lugar a fenómenos de fallo como los ya conocidos causados por la fatiga de piezas constructivas sometidas a sollicitación por flexión: se producen roturas permanentes. En el rodamiento, estas superficies de rotura discurren en gran medida paralelamente a la superficie, dando lugar a exfoliaciones de material que se designan con expresiones como “daños por fatiga, descascarillado, pittings, exfoliaciones, punteado gris, micropittings o formación de hoyuelos”.

Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

• Fatiga clásica

Incluso en condiciones de servicio muy favorables, es decir, película lubricante con efecto separador hidrodinámico, máxima limpieza del lubricante y temperaturas moderadas, en las partes de rodamientos pueden producirse daños por fatiga dependiendo de la carga. Para un número característico de la carga

$$f_{s^*} = C_0/P_{0^*} \geq 8$$

(C_0 = capacidad de carga estática, P_{0^*} = carga equivalente), en las condiciones citadas se puede partir del supuesto de resistencia a la fatiga. Para cargas mayores, es decir, para valores de f_{s^*} inferiores, se puede contar con un deterioro por fatiga al cabo de un tiempo de servicio más o menos prolongado.

Este tipo de daños clásicos por fatiga, en los que al principio se producen grietas por debajo de la superficie, se producen con relativamente poca frecuencia en la práctica. Con mucha más frecuencia, los daños por fatiga empiezan a consecuencia de una lubricación desfavorable o por falta de limpieza en la superficie de contacto de rodadura. Por lo general, cuando el deterioro está avanzado ya no se pueden reconocer las causas.

Características:

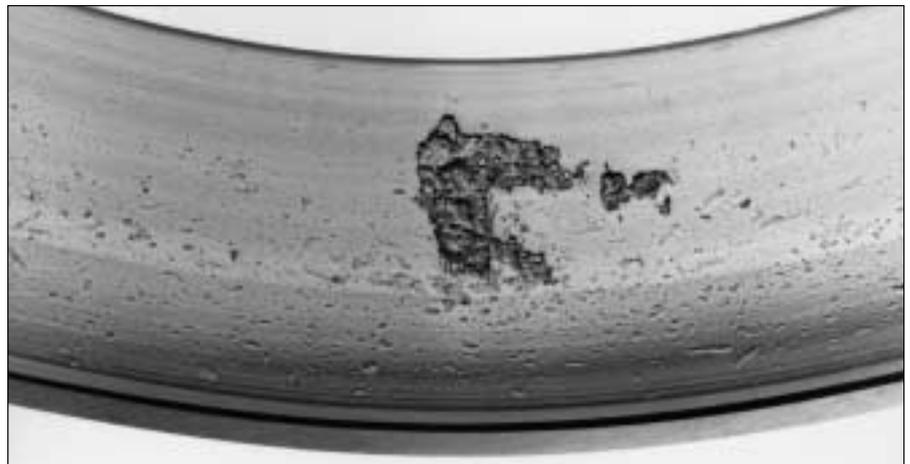
La formación de grietas bajo la superficie en los caminos de rodadura y en los elementos rodantes, exfoliaciones de material (pitting relativamente profundo); las zonas del camino de rodadura no dañadas tienen en una primera fase las características de una buena lubricación (véase figura 23), a pesar de lo cual, según el grado de progreso del deterioro se pueden reconocer impresiones más o menos numerosas originadas por fragmentos de rotura recorridos por los elementos rodantes (véase figura 31), tal como se puede ver en las figuras 41 a 43.



41: La fatiga clásica se pone de manifiesto en los hoyuelos (pitting) del camino de rodadura del aro interior de un rodamiento rígido de bolas. En la fase de deterioro avanzada se produce exfoliación de material en todo el camino de rodadura.



42: Deterioro avanzado por fatiga en un rodamiento rígido de bolas



43: Deterioro por fatiga en el camino de rodadura del aro exterior de un rodamiento de rodillos cónicos

Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

• Fatiga a consecuencia de la rodadura sobre cuerpos extraños

En presencia de elevada contaminación en el rodamiento se produce una notable reducción de la vida a fatiga, figura 44. El efecto perjudicial de los cuerpos extraños en cada caso concreto depende de su dureza, tamaño y cantidad, así como del tamaño del rodamiento. En lo que respecta a la fatiga, los rodamientos de bolas reaccionan a la contaminación de forma más sensible que los rodamientos de rodillos, mientras que los rodamientos con elementos rodantes pequeños son más sensibles que los equipados con elementos rodantes grandes. En las indentaciones de cuerpos extraños resultan críticos los albeos del borde que se forman en el proceso. En las subsiguientes rodaduras, estos albeos son sometidos a una sollicitación especialmente intensa, y junto a ellos se forman las primeras grietas incipientes; véase la imagen obtenida con el microscopio electrónico de barrido que figura en el capítulo 4.

Características:

Exfoliaciones de material; ensanchamiento en forma de V detrás de la indentación del cuerpo extraño en el sentido de rodadura (pitting en V), figura 45.

Causa:

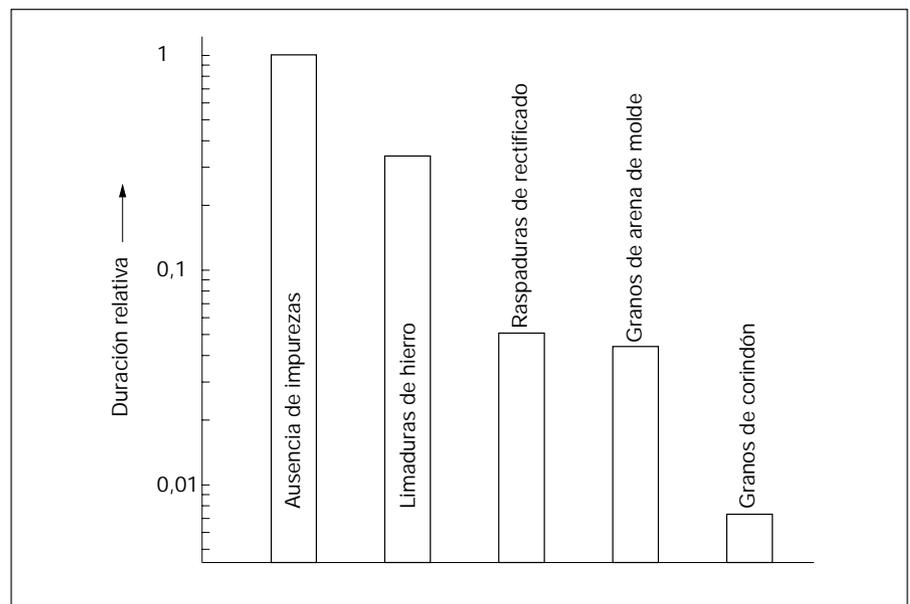
Desgaste del camino de rodadura; especialmente peligrosas son las indentaciones de partículas duras (arena de moldes, agentes abrasivos).

Medidas correctoras:

– Lavar a fondo las piezas del alojamiento, pintarlas en caso necesario

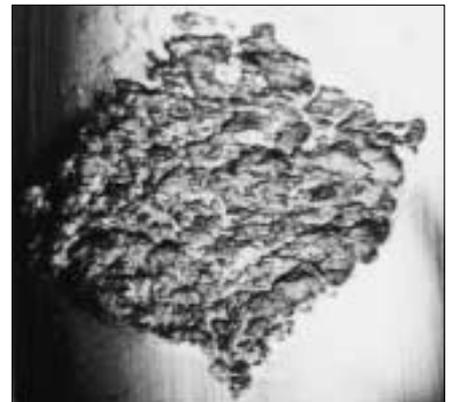
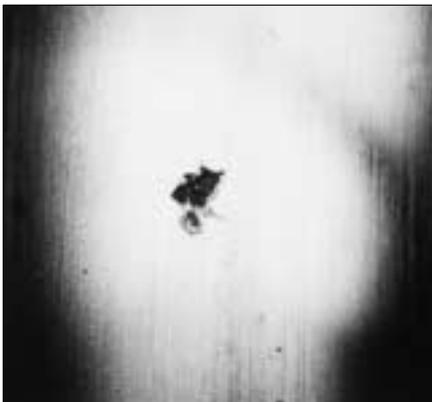
- Limpieza y esmero en el montaje
- Mejora de la obturación.
- Emplear un tipo de rodamiento protegido contra la contaminación
- Limpieza del lubricante
- Procesos de lavado con filtración antes de la puesta en servicio del grupo

44: Disminución de la vida a causa de diversas impurezas



45: Los daños por fatiga debidos a indentaciones de cuerpos extraños se extienden en forma de V en el sentido de rodadura

- a: Deterioro en el momento del reconocimiento;
- b: Deterioro al cabo de 1.000 horas de servicio;
- c: Deterioro al cabo de 1.200 horas de servicio



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

• Fatiga a consecuencia de sobrecarga estática

Análogamente a lo que ocurre en el caso de las indentaciones de cuerpos extraños, la sobrecarga estática elevada de un rodamiento da lugar a indentaciones de los elementos rodantes, cuyos alabeos marginales son las principales causas de fallos.

Características:

En la fase más temprana, indentaciones a distancia uniforme del borde y con la misma separación que los elementos rodantes, de las cuales parten roturas que a menudo están limitadas a una parte del perímetro.

En algunas ocasiones, este fenómeno sólo se presenta en un aro, habitualmente de forma asimétrica con respecto al centro del camino de rodadura.

Causas:

- Sobrecarga estática, impactos de choques
- Fuerzas de montaje aplicadas a través de los elementos rodantes

Medidas correctoras:

- Montaje según las instrucciones
- No aplicar ninguna fuerza de impacto elevada; no sobrecargar

• Fatiga a consecuencia de montaje defectuoso

Características:

En los rodamientos de bolas de contacto angular, fatiga en las proximidades del borde pequeño, fuera de la zona del ángulo de contacto, figura 46.

Causas:

- Ajuste insuficiente
- Fenómenos de asentamiento de las su-

perficies de contacto axiales o en las roscas de los tornillos de apriete

- Precarga radial

Medidas correctoras:

- Construcción rígida de las partes anexas
- Montaje correcto

46: Deterioro por fatiga en el fondo de la garganta del aro interior de un rodamiento de bolas de contacto angular, como consecuencia de una fuerza de ajuste insuficiente



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

- Fatiga a consecuencia de arriostado oblicuo/ladeo

Características:

- Huella de giro en el camino de rodadura en posición asimétrica con respecto al centro del rodamiento, figura 40
- Fatiga en los bordes del camino de rodadura o de los elementos rodantes, figura 47
- Muecas en las superficies de las bolas en toda la circunferencia o sólo en parte de ella, originadas por deformación plástica, y por lo tanto con transiciones suaves. En caso extremo, también con grietas en el fondo de la entalla, figura 48.

Causa:

Debido a desalineación del alojamiento o a flexión del eje, se produce un ladeo del aro interior con respecto al aro exterior, y por consiguiente una carga de momentos elevada. En los rodamientos de bolas, esto da lugar a esfuerzos en los alvéolos de la jaula (apartado 3.5.4) y a un aumento del deslizamiento en los caminos de rodadura, así como a roce de las bolas sobre los rebordes. En los rodamientos de rodillos, el camino de rodadura recibe la carga asimétricamente; en caso de ladeo intenso, soportan también el esfuerzo los bordes de los caminos de rodadura y de los elementos rodantes, lo que produce en estos lugares aumentos considerables de la tensión; véase también “Huellas de rodadura en el caso de arriostado oblicuo”, en el subapartado 3.3.1.2.

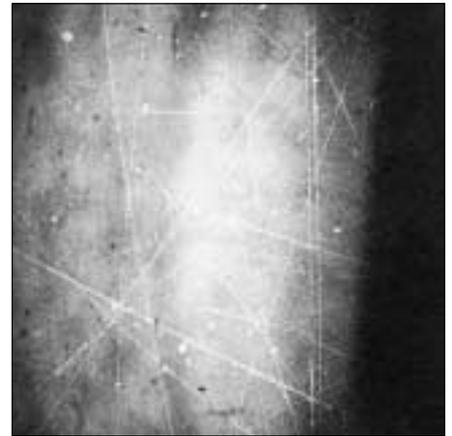
Medidas correctoras:

- Emplear rodamientos autoalineables
- Corregir los errores de alineación
- Reforzar el eje

- 47: En el borde del camino de rodadura de rodamientos de rodillos cónicos sometidos a arriostado oblicuo puede producirse fatiga por sobrecarga local.



- 48: La fatiga en el borde del camino de rodadura de los rodamientos de bolas se produce, por ejemplo, en caso de carga de momentos elevada (marcha sobre los rebordes); a la izquierda, borde del camino de rodadura; a la derecha, bola.



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

- **Fatiga a consecuencia de una mala lubricación**

Características:

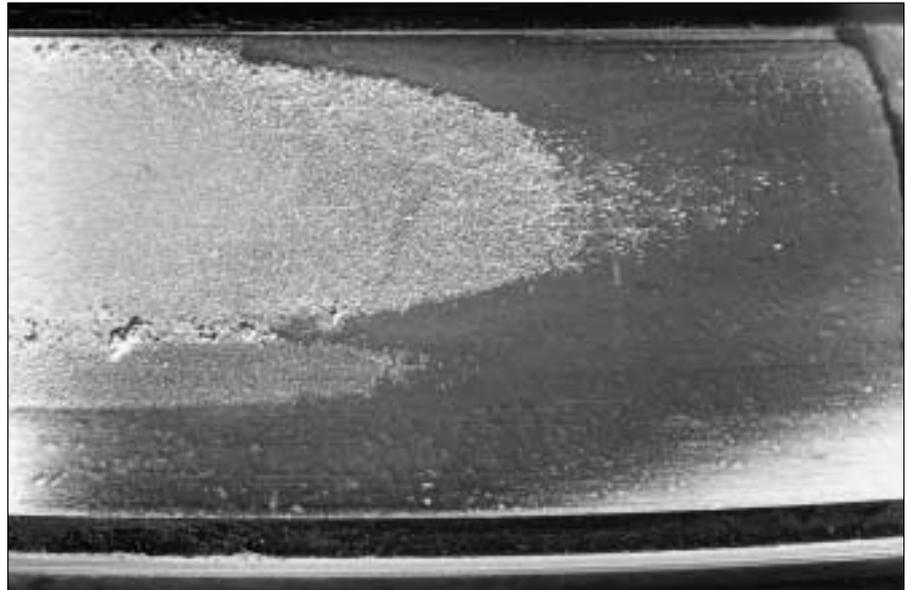
Dependiendo de la carga, en el caso de una mala lubricación pueden producirse diversos cuadros de daños. En caso de carga relativamente baja y existencia simultánea de deslizamientos, se producen roturas superficiales minúsculas. Como estas roturas aparecen en gran número, tienen el aspecto de manchas sobre el camino de rodadura, figura 49. En este caso se habla de punteado gris o micropittings. En el caso de carga muy elevada en presencia de un lubricante diluido por ejemplo a causa de la entrada de agua, en los caminos de rodadura pulidos por presión (figura 29) se forman también pittings poco profundos en forma de concha, figura 50. En el caso de sollicitaciones muy elevadas y estado de lubricación deficiente al mismo tiempo, se pueden producir zonas de calentamiento en el camino de rodadura, en las cuales se forman fisuras superficiales por el paso de los elementos rodantes.

Causas:

- Estado de lubricación deficiente a consecuencia de
 - insuficiente aportación de lubricante
 - temperatura de servicio excesivamente elevada
 - entrada de agua debido a ello, se produce una elevada fricción y sollicitación del material en la superficie del camino de rodadura
- A veces, también deslizamientos

Medidas correctoras:

- Aumentar la cantidad de lubricante
- Empleo de un lubricante con mayor viscosidad, a ser posible con aditivos EP de comprobada eficacia
- Refrigeración del lubricante y del lugar de emplazamiento del rodamiento
- Eventualmente, emplear grasa más blanda
- Evitar la entrada de agua



49: Micropittings



50: Fatiga en forma de concha

Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

• Fatiga a consecuencia de desgaste

Características:

Exfoliación local, p. ej. en elementos rodantes de rodamientos de rodillos cónicos, figuras 51 y 52. Huella de rodadura rayada en el camino de rodadura, figura 68.

Causa:

Modificación de la geometría de las partes que intervienen en la rodadura por desgaste en el caso de un lubricante contaminado, p. ej., debido a la penetración de cuerpos extraños cuando las obturaciones están dañadas. A consecuencia de ello se produce una sobrecarga local, a veces también en combinación con un ajuste insuficiente de los rodamientos de rodillos cónicos.

Medidas correctoras:

- Sustitución del lubricante a su debido tiempo
- Filtración del aceite lubricante
- Mejora de la obturación
- Sustitución a su debido tiempo de obturaciones desgastadas
- Tratamiento térmico especial de aros y rodillos

• Fatiga por rotura de la capa cementada

Características:

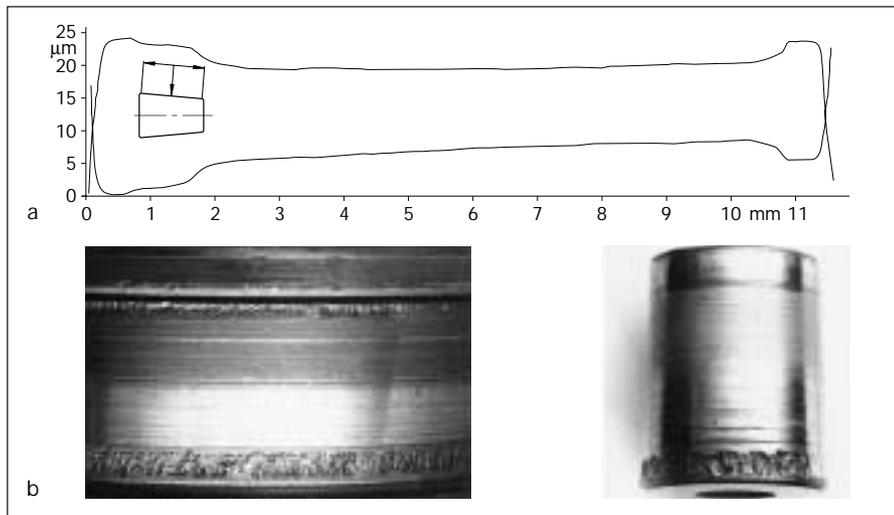
En partes de rodamiento templadas por cementación, exfoliación del camino de rodadura en placas gruesas

Causas:

- Rotura o desprendimiento de la capa cementada
- Carga demasiado elevada o espesor de la capa cementada insuficiente para la carga existente, p. ej., debido a hipótesis de cargas erróneas

Medidas correctoras:

- Adaptar el espesor de la capa cementada a las condiciones de la carga
- Evitar sobrecargas



51: El desgaste zonal puede modificar la geometría de las partes que intervienen en la rodadura de tal modo que se produzca fatiga a consecuencia de sobrecarga local
a: Registro de forma transversal de un rodillo
b: Camino de rodadura del aro interior y rodillo afectados de deterioro por fatiga.



52: Mecanismo de fallo como en la figura 51, pero en este caso el desgaste se produce junto a los bordes del camino de rodadura, en cuanto al registro de forma transversal del rodillo, véase figura 69.

Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

3.3.2.2 Daños por oxidación

• Oxidación originada por la humedad

Características:

Descoloración marrón en las superficies de rodadura y en las superficies exteriores, generalmente distribuida no uniformemente en forma de excoriaciones aisladas, figura 53.

En muchos casos, también se producen manchas de oxidación aisladas con excoriaciones a la distancia de los elementos rodantes (oxidación en las paradas). Por efecto de capilaridad, en caso de una parada

prolongada, la humedad se dirige predominantemente a los lugares de contacto, figura 54. Más tarde se produce desgaste y una fatiga prematura, partiendo de las picaduras producidas por oxidación.

Causas:

- Almacenamiento inadecuado (humedad atmosférica relativa > 60 %)
- Grandes variaciones de temperatura (formación de agua de condensación)
- Fallo de las obturaciones (intensificado por la acción abrasiva de la suciedad, figura 87)
- Lubricante inadecuado

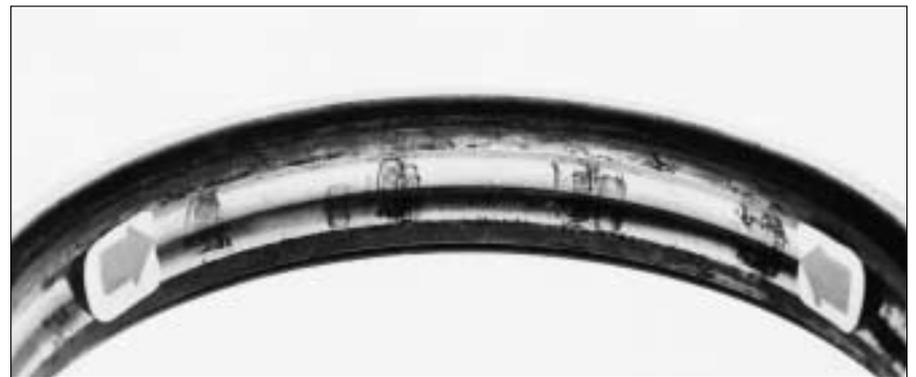
Medidas correctoras:

- Almacenamiento adecuado conforme a las instrucciones del fabricante de los rodamientos
- Mejora de la obturación (eventualmente, tapas de protección)
- Empleo de lubricante con aditivos protectores contra la oxidación
- En el caso de lubricación con grasa, reengrase frecuente, sobre todo antes de los tiempos de parada



53: Oxidación en el aro exterior de un rodamiento rígido de bolas cuya protección contra la corrosión ha sido destruida por la humedad

54: Excoriaciones producidas por oxidación en el camino de rodadura a la distancia de los cuerpos rodantes



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

- Corrosión por medios agresivos

Características:

Excoriaciones por corrosión, que generalmente toman un color negro, figura 55,

Causas:

- Almacenamiento inadecuado (almacenamiento de productos químicos corrosivos en el mismo local)
- Fallo de la obturación
- Lubricante inadecuado

Medidas correctoras:

- Almacenamiento de acuerdo con las instrucciones del fabricante de rodamientos
- Mejora de la obturación
- Empleo de un lubricante con aditivos protectores contra la corrosión

55: Daños superficiales debidos a la acción de medios agresivos. Las excoriaciones por corrosión toman por lo general un color negro.



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

3.3.2.3 Falso Brinelling

Características:

Marcas en las superficies de los caminos de rodadura a la distancia de los cuerpos rodantes, figuras 56 y 57. A diferencia de las marcas originadas por un montaje defectuoso (véase subapartado 3.3.2.4 “Indentaciones producidas por los elementos rodantes”), no se producen alveos en los bordes. Las superficies de las indentaciones suelen tomar un color marrón (corrosión), y, sobre todo en el caso de rodamientos de bolas, adquieren una gran rugosidad (falta la estructura de acabado). En el caso de rodamientos de bolas también se pueden reconocer a veces estrias en dirección axial. Si entre tanto el rodamiento experimenta un cierto giro, se forman con frecuencia varios juegos de marcas de paradas próximos entre sí.

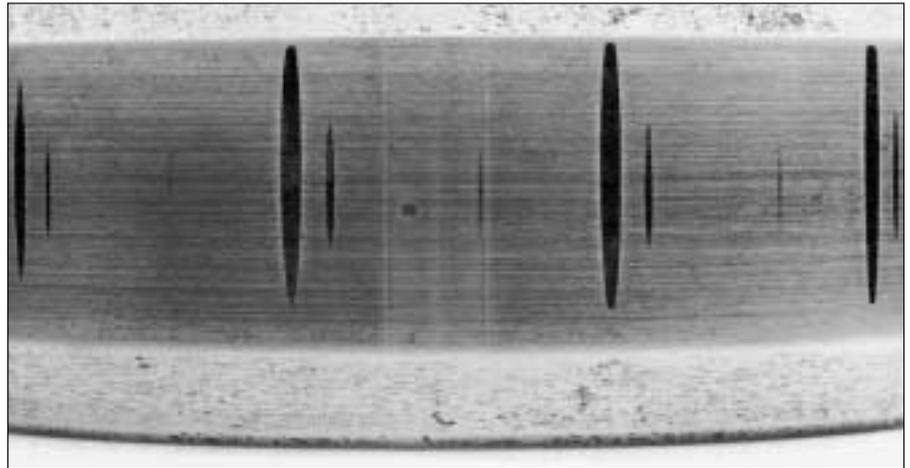
Causa:

Vibraciones en las máquinas paradas, que dan lugar a micromovimientos en los lugares de contacto de las partes que intervienen en la rodadura

Medidas correctoras:

- Eliminar/amortiguar las vibraciones
- No parar las máquinas afectadas, sino dejarlas funcionando;
- Emplear dispositivos de seguridad para el transporte que descarguen o precarguen los rodamientos.
- Emplear un lubricante adecuado (incorporación de aditivos).
- En el caso de cargas circunferenciales, elegir un juego radial relativamente elevado.

56: En el aro interior de un rodamiento de rodillos cilíndricos se han formado en el camino de rodadura marcas de falso brinelling a la distancia de los elementos rodantes



57: Falso brinelling en un rodamiento de bolas



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

3.3.2.4 Indentaciones producidas por los elementos rodantes

Características:

Indentaciones a la distancia de los elementos rodantes en los caminos de rodadura de rodamientos no desmontables, figura 58. En ocasiones, fatiga con origen en estos lugares; véase también “Fatiga a consecuencia de sobrecarga estática” en el subapartado 3.3.2.1.

Las indentaciones pueden haberse originado también en el desmontaje: préstese atención a las características producidas por el paso de los elementos rodantes sobre estos lugares (bordes brillantes), establecer el sentido de montaje.

Causas:

- Sobrecarga estática/impactos de choques
- Las fuerzas de montaje o de desmontaje se han aplicado a través de los elementos rodantes (orden de montaje incorrecto, medios auxiliares inadecuados)

Medidas correctoras:

Montar primero el aro ajustado fijo: en caso de ajuste fijo de ambos aros, calar ambos a presión con una arandela



58: Indentaciones producidas por las bolas en los bordes de un rodamiento rígido de bolas. La herramienta de montaje ha sido aplicada en el aro con ajuste deslizante, y por lo tanto, las fuerzas han sido conducidas a través de las bolas.

Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

3.3.2.5 Cráteres y estrías transversales originados por el paso de corriente

- Cráteres

Características:

Cráteres de fusión en las zonas de contacto de los elementos rodantes con el camino de rodadura; en ocasiones, varios cráteres consecutivos o cadenas completas en el perímetro. La superficie de los cráteres tiene a veces la forma de cordones de soldadura, figura 59

Causa:

Pasos de corriente, p. ej. al soldar o por fallo de las tomas de tierra

Medidas correctoras:

En las soldaduras eléctricas, no conducir corriente a través del rodamiento (toma de tierra).

- Estrías

Características:

Marcas paralelas al eje que toman un color marrón y ocupan grandes partes del camino de rodadura o incluso todo el perímetro de este, figura 60

Causa:

Flujo continuado de corriente alterna o continua, marcas posibles incluso en caso de paso de corriente reducido

Medidas correctoras:

- No dejar circular la corriente a través del rodamiento (toma de tierra, aislamiento).
- Emplear rodamientos aislados contra el paso de corriente.

60: La formación de estrías en el camino de rodadura del aro exterior se ha generado por el paso continuado de corriente

59: Las descargas eléctricas han dado lugar a la formación de cráteres en el camino de rodadura de un rodamiento de rodillos cilíndricos.



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

3.3.2.6 Marcha de los elementos rodantes sobre los rebordes

Características:

En el caso de las bolas, entalladuras en forma de arco sobre la superficie que pueden incluso llegar a describirse como “ovillos completos” de entalladuras, bordes redondeados por deformación plástica, figuras 61, 62. En el caso de los rodillos, entalladuras a lo largo de todo el perímetro cerca de las su-

perficie frontales. No deben confundirse con las estrías producidas por cuerpos extraños; véase subapartado 3.3.4.2 “Rayado de las superficies en los elementos rodantes”.

Causas:

- Carga (axial) excesiva
- Carga de momentos excesivamente elevada
- Excesivo juego interno de servicio
- Ladeo

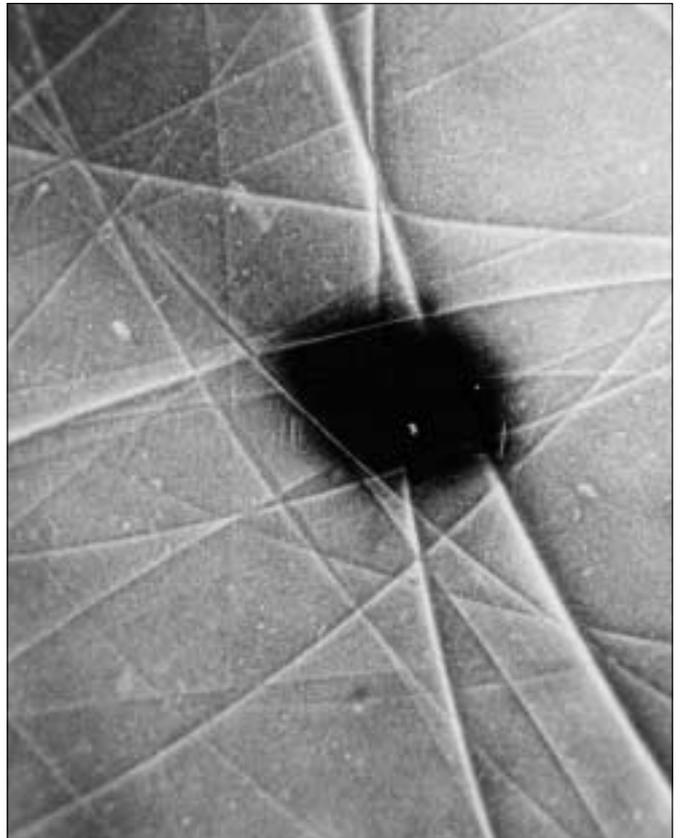
Medidas correctoras:

- Evitar las sobrecargas
- Emplear un rodamiento con mayor capacidad de carga
- Restringir el juego interno de servicio
- Evitar los ladeos

61: Bola con huellas extremas de marcha sobre los rebordes, originadas por una carga constante durante tiempo prolongado



62: Bola con “ovillos completos” de entalladuras, originados por carga variable durante tiempo prolongado



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

3.3.3 Roturas de aros

3.3.3.1 Roturas ocasionadas por fatiga del camino de rodadura

Características:

En la mayoría de los casos, daños por fatiga de gran superficie en el camino de rodadura; con frecuencia, formación de escalones (líneas de trama) en la superficie de rotura, figura 63

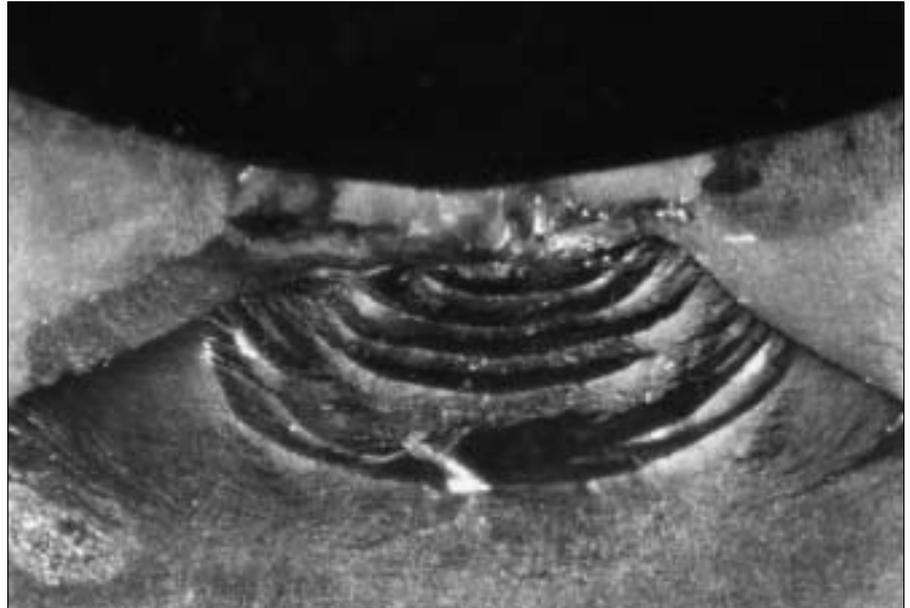
Causa:

Daños por fatiga muy avanzados

Medidas correctoras:

Véase subapartado 3.3.2.1 “Roturas”

63: Rotura del aro exterior de un rodamiento rígido de bolas en dirección axial a consecuencia de fatiga



3.3.3.2 Fisuras incipientes o roturas de aros interiores en dirección axial

Características:

Aro completo o parcialmente roto en dirección axial. Bordes de rotura ligeramente redondeados: síntomas de que la rotura se ha producido durante el servicio y han pasado sobre ella los elementos rodantes. Si los flancos de rotura tienen aristas agudas, la rotura se ha producido en el desmontaje. En caso de un largo tiempo de servicio con una rotura, sus bordes también pueden estar en parte rotos, figura 64.

Causas:

- Deslizamiento del rodamiento
- Roturas en el camino de rodadura
- Giro del aro interior sobre el eje
- Lubricación inadecuada
- Ajuste demasiado fuerte sobre el eje
- Ranura circular en el eje
- Defectos de redondez
- Rozamiento con partes anexas

Medidas correctoras:

- Mejorar la lubricación (incorporación de aditivos, aumentar la cantidad de aceite
- Encontrar un remedio para los daños en el camino de rodadura
- Elegir un ajuste apropiado
- Evitar el rozamiento con partes anexas
- Crear mejores condiciones de asiento
- Tratamiento térmico especial de los aros

64: Rotura axial del aro interior de un rodamiento oscilante de rodillos



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

3.3.3.3 Roturas del aro exterior en sentido circunferencial

Características:

En la mayoría de los casos, la rotura discurre con una notable uniformidad en dirección circunferencial. Frecuentemente se producen varios fragmentos de rotura. En el caso de carga axial, estos fragmentos se forman por lo general algo desplazados con respecto al centro del camino de rodadura. A menudo, estas rotu-

ras están provocadas por daños debidos a la fatiga. La superficie lateral del aro exterior muestra por lo general una huella de contacto poco uniforme, figura 65.

Causa:

Apoyo incorrecto del aro en el alojamiento

Medidas correctoras:

Mejorar constructivamente el montaje.

65: Rotura de un aro exterior en dirección circunferencial



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

3.3.4 Rayado y huellas de deslizamiento en las superficies de contacto

Además de roturas locales, grietas y otras impresiones en los caminos de rodadura o en las superficies de los elementos rodantes, en el rodamiento también se producen con frecuencia daños superficiales a consecuencia de fenómenos de deslizamiento que dan lugar a desgaste. La magnitud de estos daños no sólo depende de las condiciones de rodadura, sino también, muy principalmente, de la intensidad y la limpieza de la lubricación.

3.3.4.1 Daños por desgaste debidos a una lubricación deficiente

Características:

Las superficies de contacto son mates y rugosas, figuras 28 y 66. El lubricante toma un color oscuro por efecto de la abrasión; en las jaulas de latón, también toma un color amarillo. La grasa también se endurece con frecuencia debido a la abrasión. Pero en muchos casos, el lubricante también adquiere una consistencia líquida por efecto de la humedad. La precarga se elimina, o se produce un aumento del juego interno. Si los elementos extraños son los causantes del desgaste, sobre todo las superficies de los elementos rodantes se vuelven muy estriadas, figura 67. En condiciones desfavorables, los caminos de rodadura de los rodamientos de rodillos pueden desgastarse irregularmente a lo ancho; los caminos de rodadura tienen entonces un aspecto rayado en dirección circunferencial, figuras 68 y 69. Con el paso del tiempo, esta forma de desgaste da lugar a daños por fatiga; véase "Fatiga a consecuencia de desgaste", en el subapartado 3.3.2.1.

Causas:

- Rotura de la película de lubricante
- Contaminantes en el lubricante (partículas finas y duras, p. ej., polvo, o incluso agua)
- En caso de desgaste no uniforme en rodamientos de rodillos cónicos, también ajuste axial insuficiente

66: Camino de rodadura gastado, rugoso



67: Las huellas de desgaste se suelen poder reconocer en primer lugar en las superficies de los cuerpos rodantes.



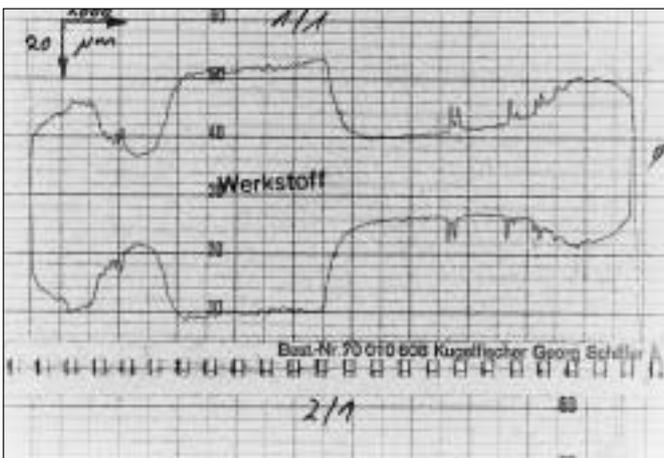
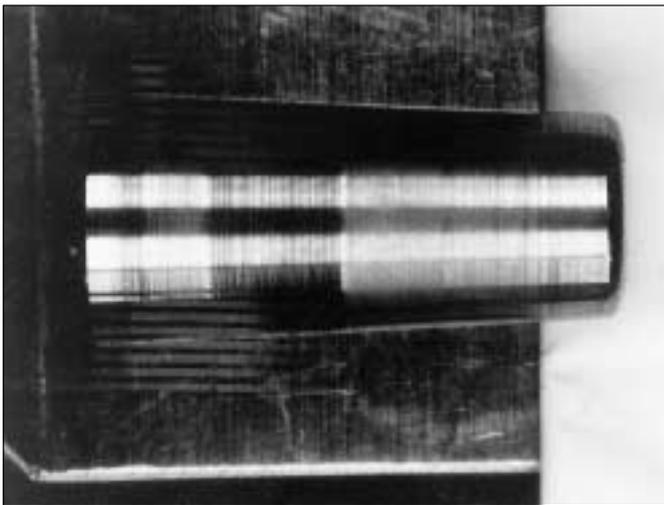
Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

Medidas correctoras:

- Emplear un lubricante con mayor capacidad de carga, p. ej., con una mayor viscosidad o aditivos EP
- Acortamiento de los intervalos de tiempo entre los cambios de lubricante
- Mejorar la obturación
- Filtrar el lubricante
- Asegurar un correcto ajuste axial

68: Formación de estrías a consecuencia de desgaste en zonas determinadas a: rodillo



b: camino de rodadura



69: Registro por palpación correspondiente a la figura 68a

Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

3.3.4.2 Rayado de las superficies en los elementos rodantes

Características:

Entallas circunferenciales en las superficies de contacto de los elementos rodantes. En el caso de los rodillos, como anillos paralelos, figura 70 y 71, en el caso de bolas, la mayor parte en forma de ovillo completo, Fig. 72. Estas formaciones no se deben confundir con huellas de marcha sobre los rebordes (véase subapartado 3.3.2.6). La marcha sobre los rebordes genera huellas con bordes suaves por deformación plástica; las rayaduras tienen los bordes agudos. Con frecuencia quedan impresas partículas duras en los alvéolos de las jaulas, las cuales son las causantes de las rayaduras, figura 73.

Causa:

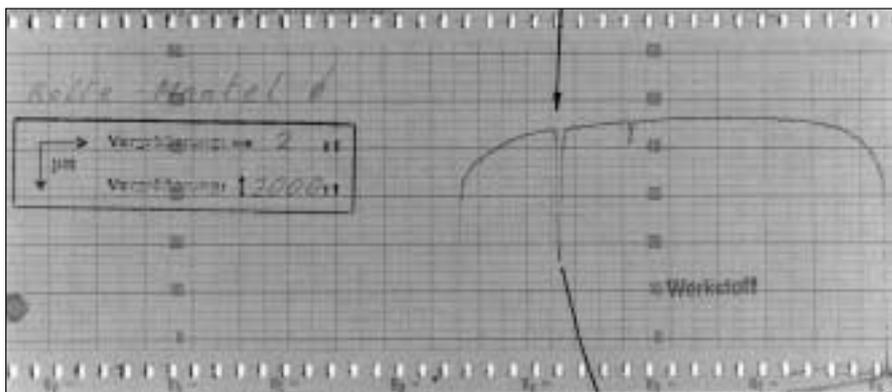
Lubricante sucio: En los alvéolos de las jaulas quedan adheridas partículas duras, que actúan como los granos de una muela abrasiva.

Medidas correctoras:

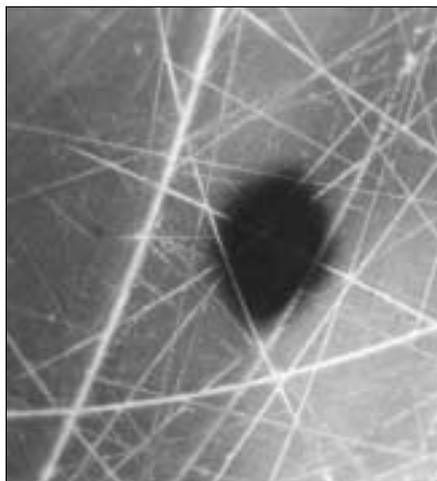
- Procurar un montaje limpio
- Mejorar la obturación
- Filtrar el lubricante



70: Profundas rayaduras aisladas en los rodillos a consecuencia de la retención de cuerpos extraños en la jaula

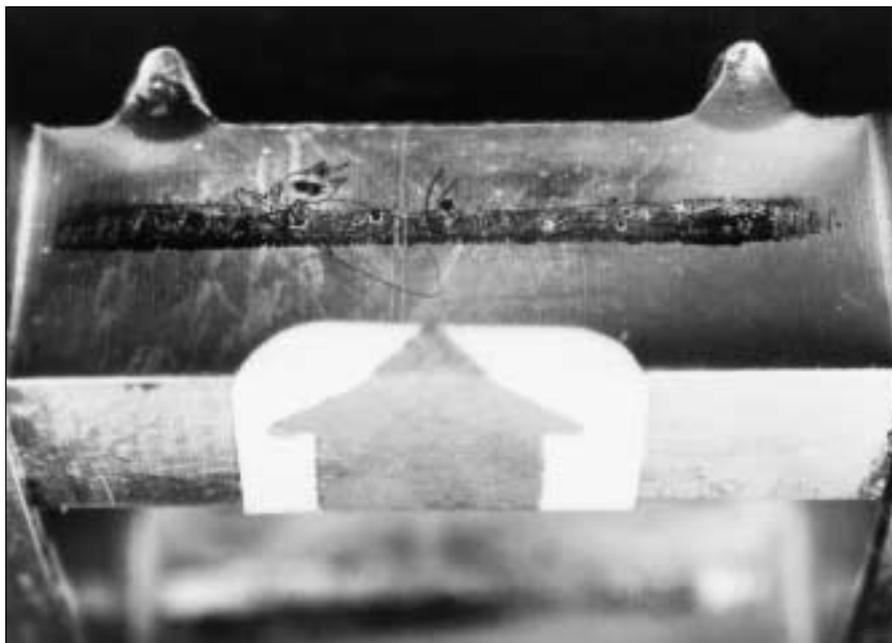


71: Registro de palpación correspondiente a la figura 70



72: Rayaduras en la superficie de una bola en forma de ovillo completo

73: Inclusiones de material extraño en la costilla de la jaula de un rodamiento



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

3.3.4.3 Huellas de deslizamiento

Características:

Los elementos rodantes deslizan, sobre todo en el caso de rodillos grandes y pesados, p. ej., en rodamientos de rodillos sin jaula. Rugosidades de los caminos de rodadura o de los elementos rodantes. Con frecuencia, también desgarros materiales y huellas de deslizamiento. En la mayoría de los casos, no distribuidos uniformemente sobre la superficie, sino en forma de manchas, figuras 74 y 75. Frecuentemente, también acompañados de micropittings; véase “Fatiga a consecuencia de una lubricación deficiente”, en el subapartado 3.3.4.1.

Causas:

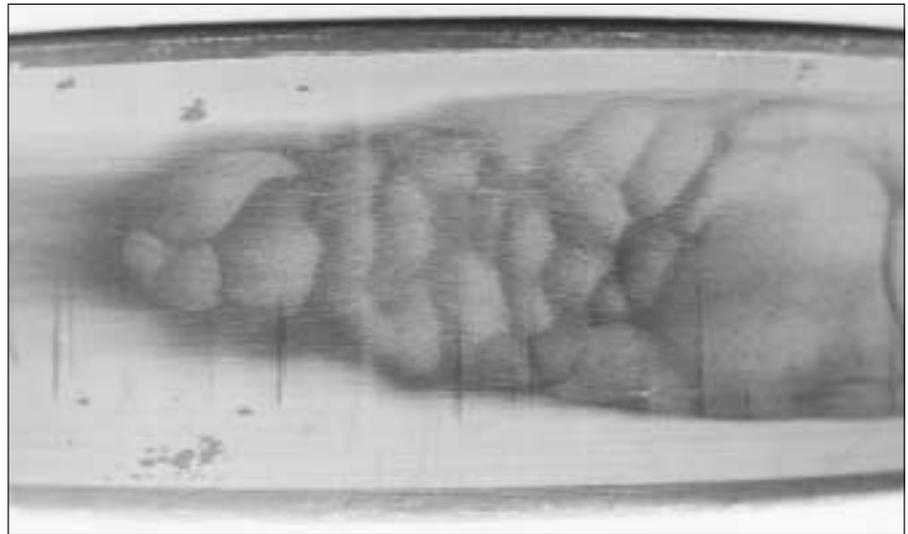
- En caso de una carga demasiado baja y lubricación deficiente, deslizamiento de los elementos rodantes sobre los caminos de rodadura. En ocasiones, también zonas de carga demasiado cortas, debido a lo cual se produce un frenado de los elementos rodantes en la zona no sometida a carga de los alvéolos de la jaula y subsiguientes aceleraciones al llegar a la zona de carga.
- Variaciones rápidas de la velocidad de rotación

Medidas correctoras:

- Emplear rodamientos con menor capacidad de carga
- Someter los rodamientos a precarga, p. ej. con muelles
- Disminuir el juego interno del rodamiento
- Asegurar una carga suficiente incluso en los periodos de prueba
- Mejora de la lubricación



74: Huellas de deslizamiento en rodillos cilíndricos



75: Daños por deslizamiento en el aro interior de un rodamiento de rodillos cilíndricos

Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

3.3.4.4 Estrías longitudinales

Características:

Desplazamientos de material paralelos al eje a la distancia de los elementos rodantes en los caminos de rodadura y en los elementos rodantes de rodamientos desmontables de rodillos cilíndricos o de rodillos cónicos. En algunas ocasiones, también se forman varias series de marcas de este tipo, desplazadas entre sí algunos grados a lo largo de la circunferencia. Con frecuencia, no en todo el perímetro, sino sólo en 1/3 del mismo, figura 76.

Causa:

En el montaje, el aro separable y el aro con los elementos rodantes no están dispuestos concéntricamente entre sí, o es-

tán ladeados y se montan bajo presión. Este problema resulta especialmente crítico en el caso de movimiento de grandes masas (un eje pesado es insertado con el aro interior del rodamiento y los elementos rodantes en un aro exterior ya montado en el alojamiento).

Medidas correctoras:

- Emplear herramientas auxiliares de montaje adecuadas
- Evitar errores de alineación
- A ser posible montar las piezas al mismo tiempo que tiene lugar un ligero movimiento de rotación

76: Estrías longitudinales en el camino de rodadura del aro interior de un rodamiento de rodillos cilíndricos producidas por un montaje con ladeo con los elementos rodantes



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Huellas de rodadura características

3.3.5 Daños debidos a sobrecalentamiento

Características:

Descoloración* intensa de las piezas del rodamiento, grandes deformaciones plásticas de los caminos de rodadura o de los elementos rodantes. Aumento repentino de la temperatura. Con frecuencia, bloqueo del rodamiento, figura 77. Dureza Rockwell muy inferior a 58 HRC.

Causas:

A partir del cuadro de daños originado a consecuencia del sobrecalentamiento de rodamientos no suelen ser reconocibles las causas. Las posibles causas serían:

- Juego interno en servicio del rodamiento insuficiente, sobre todo

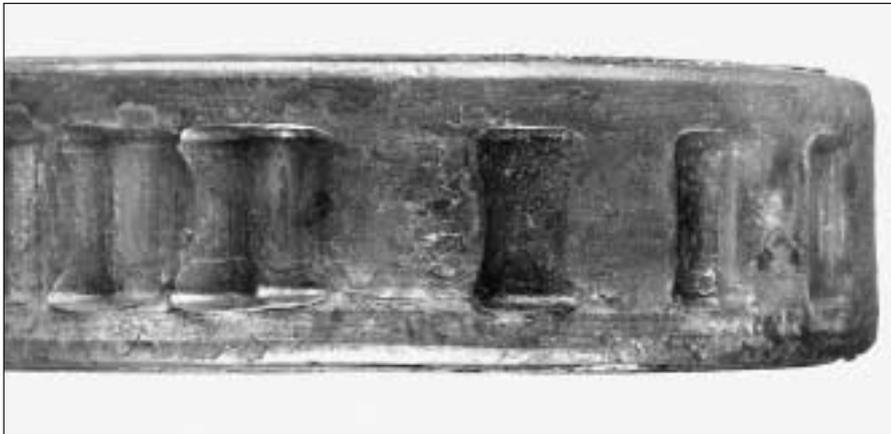
en el caso de rodamientos de elevada velocidad de giro

- Lubricación inadecuada
- Precarga radial por calentamiento exterior
- Lubricación excesiva
- Frenado del giro por rotura de la jaula

Medidas correctoras:

- Ampliar el juego interno del rodamiento
- En caso de calentamiento exterior, tener cuidado de que el calentamiento y el enfriamiento tengan lugar con suficiente lentitud, y de que el calentamiento del conjunto del rodamiento sea uniforme
- Evitar la acumulación de lubricante
- Mejorar la lubricación

77: Al bloquearse un rodamiento de rodillos cilíndricos sobrecalentado por fricción, los rodillos se han hundido profundamente en el camino de rodadura



* Nota sobre descoloraciones:

Los colores de temple se describen para daños por sobrecalentamiento. Aparecen sombras marrones y azules dependiendo de la temperatura y el tiempo. Tienen grandes parecidos con las descoloraciones de lubricante, que aparecen con mayor frecuencia (ver sección 3.3.1.1). por lo tanto, conclusiones sobre temperatura de servicio excesiva no pueden ser descritas solo por la descoloración. La escala de descoloraciones

puede servir para diferenciar entre colores de temple y descoloraciones del lubricante: mientras estas últimas se encuentran con frecuencia solo en los elementos rodantes y directamente en los caminos de rodadura, el primero se extiende a una gran parte de las superficies libres del rodamiento. Sin embargo, la única respuesta al caso de temperaturas de servicio extremadamente altas es una severa inspección.

Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Contactos en el borde

3.4 Valoración del contacto con el borde

La figura 78 muestra una superficie del borde recorrida correctamente por los elementos rodantes.

3.4.1 Daños en las superficies del borde y en las superficies frontales de los rodillos en los rodamientos de rodillos

3.4.1.1 Rayas producidas por cuerpos extraños

Características:

Arañazos curvados en la superficie del borde o en la cara frontal de los rodillos (especialmente frecuentes en el caso de rodamientos de rodillos cónicos), figuras 79 y 80. Penetran con distinta profundi-

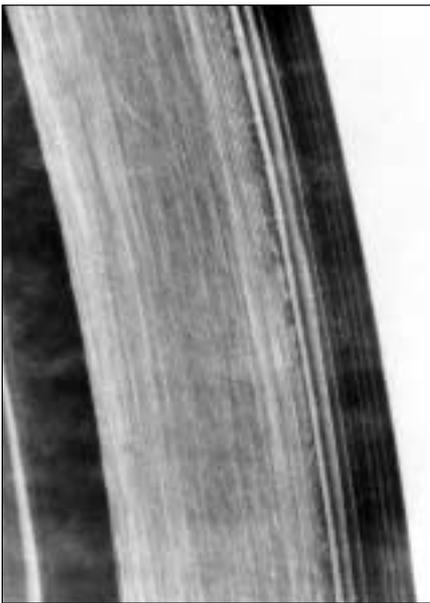
dad en la superficie del borde según en qué radio del elemento rodante ha quedado aprisionado el cuerpo extraño.

Causa:

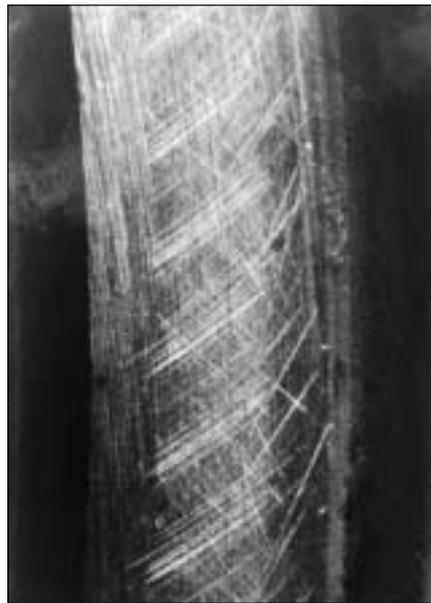
Cuerpos extraños duros en el lubricante que se introducen en el área de contacto entre rodillo/borde.

Medidas correctoras:

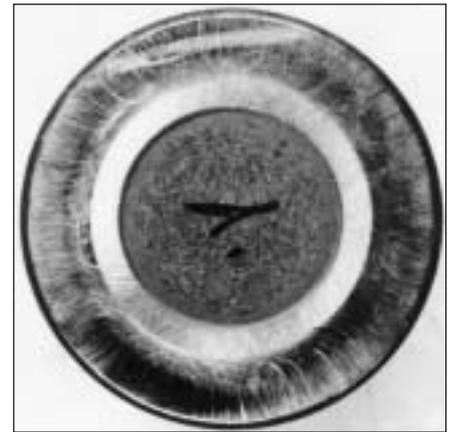
Mejorar la limpieza del lubricante.



78: Huella de contacto normal en un rodamiento de rodillos cónicos



79: Rayas en el borde producidas por cuerpos extraños



80: Rayas en la superficie frontal de un rodillo cónico

Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Contactos en el borde

3.4.1.2 Fenómenos de atascamiento en el contacto con el borde

Características:

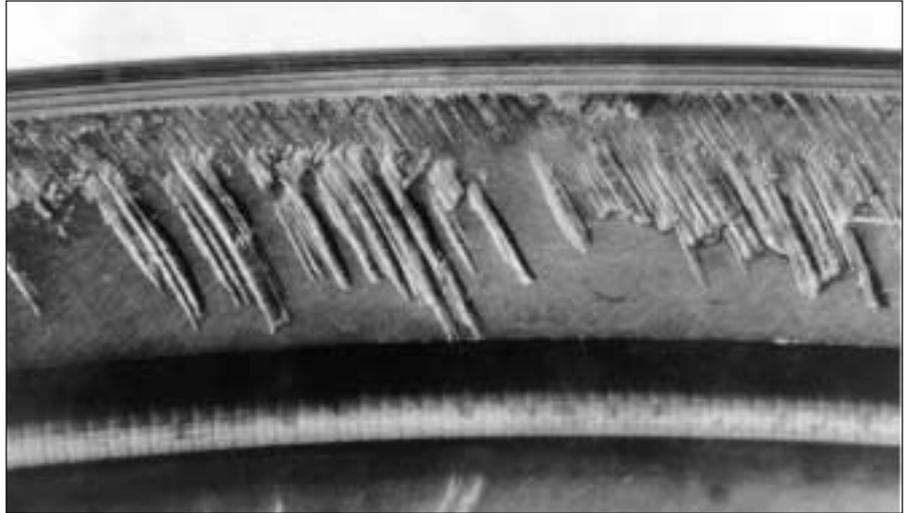
Soldaduras zonales o de gran superficie y desgarros en las superficies del borde y en las superficies frontales de los rodillos, figuras 81 y 82. De vez en cuando, también coquizaciones en esta zona. Con frecuencia, en combinación con una carga muy elevada.

Causas:

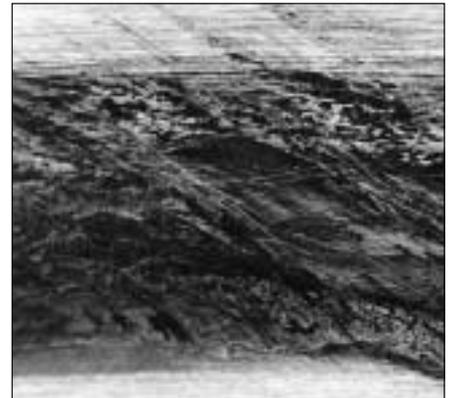
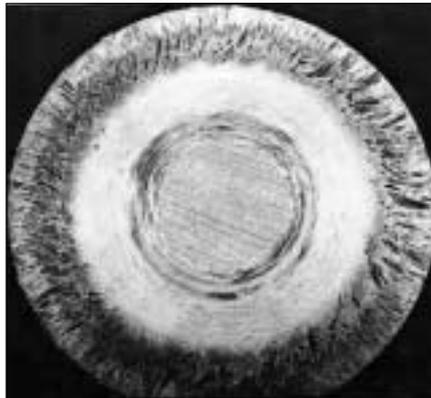
- Lubricación inadecuada en condiciones de cargas elevadas y velocidades de rotación elevadas (cantidad o viscosidad de servicio del lubricante insuficientes)
- Lubricación inadecuada en condiciones de cargas elevadas y velocidades de rotación bajas, cuando no se forma una película hidrodinámica de lubricante entre la cara frontal del rodillo y el borde
- Precarga demasiado elevada en rodamientos de rodillos cónicos
- Precarga por dilatación térmica
- Entregiro o atascamiento de los rodillos, p. ej., en caso de desgaste de los caminos de rodadura, ladeo de los aros o ajuste axial insuficiente, figura 81
- Carga axial demasiado elevada sobre rodamientos de rodillos cilíndricos
- Deformación por tensiones axiales del aro interior contra partes anexas que no son planas

Medidas correctoras:

- Mejorar la lubricación (aumentar la viscosidad, aditivos EP, aumentar la cantidad de lubricante)
- Procurar un ajuste correcto



81: Los rodillos que se atascan debido a entregiro han producido desgaste en el borde al entrar en contacto con las aristas del borde.



82: En la cara frontal de los rodillos y en el borde puede producirse desgaste por atascamiento en caso de suministro deficiente de lubricante y cargas elevadas.

Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Contactos en el borde

3.4.1.3 Desgaste en el contacto con el borde

Características:

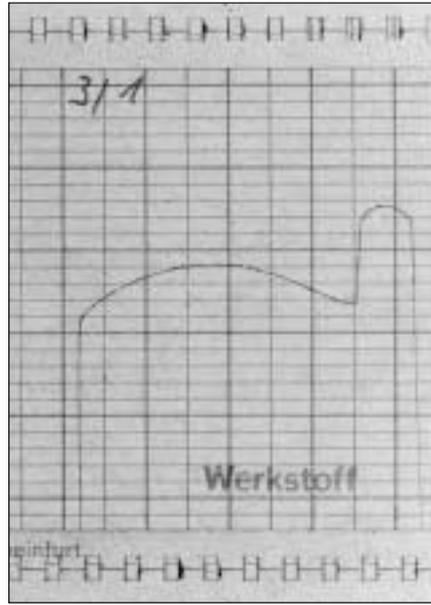
Las condiciones de lubricación deficientes en los rodamientos de rodillos se manifiestan en primer lugar en el contacto deslizante entre la pared frontal del rodillo y el borde. En casos graves se producen los fenómenos de atascamiento arriba descritos: Sin embargo, en todos los casos se produce un desgaste de las superficies de contacto. Esto se pone especialmente de manifiesto en el registro de forma transversal de las superficies del borde o las superficies frontales de los rodillos, figura 83. Con frecuencia también se forman espigas en las superficies frontales de los rodillos, figura 84. En el caso de rodamientos de rodillos cónicos se produce una eliminación de la precarga y un aumento del juego axial interno. Esto da lugar, p. ej. en engranajes a un aumento del ruido en servicio en el caso de inversión del sentido de carga. Sin embargo, en el caso de rodamientos con rodillos cónicos, la magnitud del desgaste en el contacto con el borde pasa a formar parte del juego axial interno en aproximadamente $1/3$, debido a las condiciones geométricas. El desgaste en el borde es también un indicio de desgaste del camino de rodadura o de la superficie lateral de los rodillos.

Causas:

- Lubricación inadecuada (tipo, cantidad)
- Lubricante contaminado

Medidas correctoras:

- Procurar una buena limpieza
- Elegir un lubricante adecuado (viscosidad, aditivos EP) y asegurar una aportación suficiente



83: Registro de forma transversal de una cara frontal de rodillo cónico gastada



84: Formación de espigas en rodillos cónicos

Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Contactos en el borde

3.4.1.4 Roturas del borde

Características:

Los bordes de apoyo están total o parcialmente rotos o agrietados, figura 85

Causas:

- Carga axial inadmisiblemente elevada
- Borde insuficientemente apoyado, figura 20
- Carga axial por impactos de choques
- Daños consecuenciales producidos

por rotura de la jaula o de los cuerpos rodantes

- Daños producidos en el montaje

Medidas correctoras:

- Procurar un buen apoyo del borde por medios constructivos
- Mantener las cargas dentro de los límites previstos en el proyecto
- Prestar atención a las instrucciones de montaje

85: Borde roto de un rodamiento oscilante con una hilera de rodillos. El aro interior ha sido calado en el eje a golpes de martillo



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Contactos en el borde

3.4.2 Desgaste de las superficies guía de las jaulas

Características:

Cuando las jaulas, sobre todo las de latón, están guiadas en las pestañas de los rodamientos, se puede producir desgaste en dicha zona. En la mayoría de los casos, la superficie adquiere una gran rugosidad; de vez en cuando también se producen fenómenos de atascamiento (el material de la jaula se adhiere al borde). Como por lo general la jaula no está en contacto con toda la anchura del borde, en condiciones de fuerte desgaste se forma un sedimento en el borde, figura 86. Similares características de desgaste se encuentran también en los bordes laterales de la jaula correspondiente, véase apartado 3.5.1. Están especialmente afectados los contactos en el borde de aros interiores de rodamientos que giran con rapidez.

Causas:

- Insuficiente suministro de lubricante a las superficies de contacto; a menudo, también insuficiente evacuación del lubricante
- Lubricante contaminado
- Velocidad de giro demasiado elevada para el tipo de rodamiento empleado.
- Ladeo excesivo en el montaje
- Temperatura de servicio inesperadamente elevada en el caso de jaulas de latón guiadas por el aro exterior (diferente dilatación térmica acero/latón)

Medidas correctoras:

- Mejorar la lubricación (aumento de la circulación, mayor limpieza)
- Emplear rodamientos adaptados constructivamente a las condiciones de servicio
- Revestir la jaula

86: Marcas de rozamiento en la superficie de guiado de la jaula de un aro exterior con material adherido



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Contactos en el borde

3.4.3 Daños producidos en las superficies de apoyo de las obturaciones

3.4.3.1 Desgaste en la zona de apoyo de los labios obturadores

Características:

En la posición del giro de los labios obturadores se forma, en el borde, una ranura a todo su alrededor, generalmente brillante. Además de ello, con frecuencia, también labios obturadores gastados y daños en el rodamiento a consecuencia de la entrada de suciedad. En muchos casos, también en combinación con corrosión en la zona de obturación, figura 87.

Causas:

- Acumulación extrema de suciedad procedente del exterior, sobre todo en caso de un entorno húmedo.
- El labio rueda en seco.

Medidas correctoras:

- Emplear obturaciones adicionales, p. ej. arandela centrífuga.
- Lubricar el labio obturador.

3.4.3.2 Descoloración de la huella de giro en la superficie de apoyo de la obturación

Características:

Coloración marrón o azulada en la zona de apoyo de los labios obturadores, sobre todo en el caso de retenes. Por excesivo calentamiento se produce endurecimiento y un mayor desgaste de la obturación, véase apartado 3.6.1.

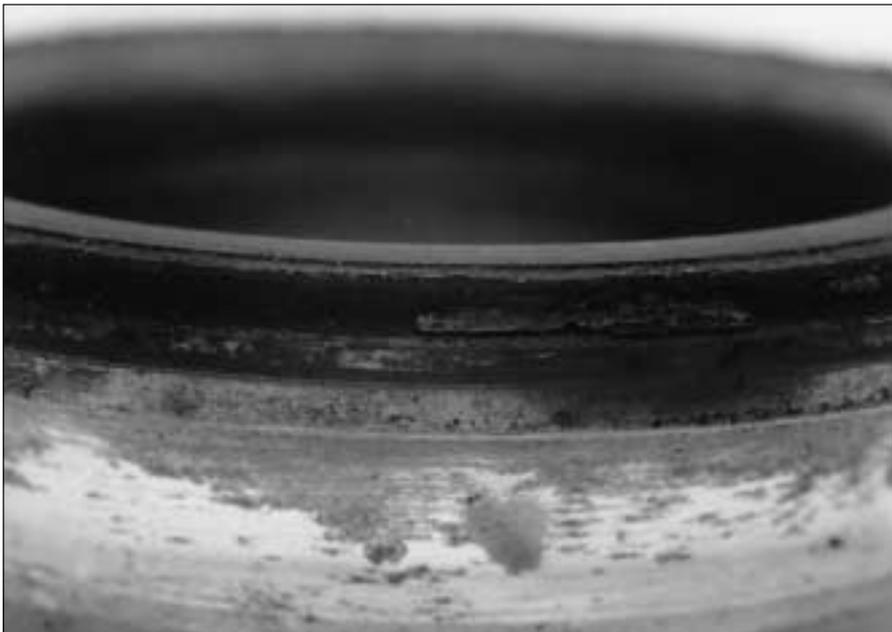
Causas:

- Calentamiento intenso del labio y de la superficie de giro del eje a consecuencia de un solapamiento excesivo o una elevada presión de la obturación
- Zona de giro de los labios obturadores insuficientemente lubricada

Medidas correctoras:

- Lubricar el labio obturador
- Disminuir la presión de apriete en la medida que sea admisible para el efecto obturador

87: Corrosión en el área de la superficie de apoyo de la obturación en el borde de un rodamiento de bolas de contacto angular



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Daños en la jaula

3.5 Daños en la jaula

3.5.1 Desgaste producido a consecuencia de falta de lubricante y contaminación.

Características:

En el caso de jaulas guiadas por una pestaña, desgaste de las zonas de guiado; en el caso de jaulas guiadas en los elementos rodantes, desgaste en los alvéolos. Como daños consecuenciales cuando el desgaste está muy avanzado, las jaulas guiadas en los elementos rodantes pueden pasar a ser guiadas por la pestaña y presentar allí desgaste, o a la inversa. Por lo general, se produce un desgaste considerablemente simétrico en dirección axial

en los alvéolos, y en el caso de rodamientos de rodillos cilíndricos en las dos zonas de guiado, figura 88.

Causas:

- Lubricante contaminado con cuerpos extraños duros
- Lubricante insuficiente o inadecuado

Medidas correctoras:

- Procurar un montaje limpio
- Filtrar el lubricante
- Aumentar la circulación del lubricante y/o emplear otra viscosidad

88: Desgaste en los márgenes laterales



3.5.2 Desgaste producido a consecuencia de una velocidad de giro excesivamente elevada

Características:

Desgaste en la superficie exterior de la jaula por roce con el aro exterior del rodamiento, figura 89.

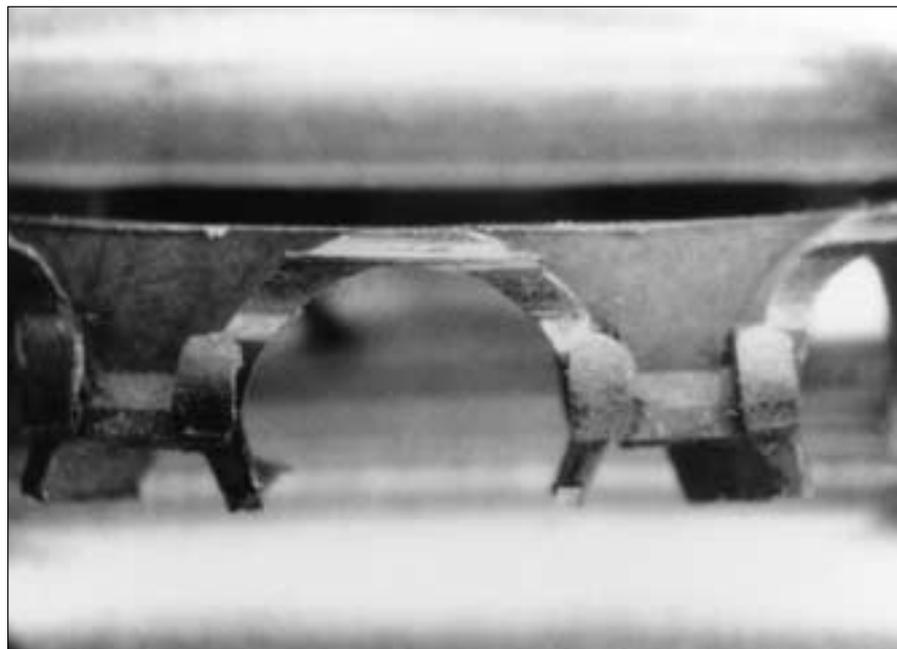
Causas:

- Velocidad de giro excesivamente elevada
- Elección de una construcción de jaula inadecuada

Medidas correctoras:

- Emplear otra clase de jaula

89: Desgaste en la superficie exterior de la jaula por roce con el aro exterior del rodamiento



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Daños en la jaula

3.5.3 Desgaste producido a consecuencia del lado de los rodillos

Características:

En el caso de rodamientos de rodillos ligeramente cargados, fuerte lado o ajuste axial insuficiente en los rodamientos de rodillos cónicos, se producen atascamientos de los rodillos debido al lado. Si estas fuerzas de atascamiento no son absorbidas por los bordes, debido a la carga inadmisiblemente elevada se originan zonas de desgaste diagonalmente opuestas entre sí en los alvéolos de la jaula. En la fase avanzada, esto puede dar lugar a roturas entre las costillas y el elemento lateral, figura 20.

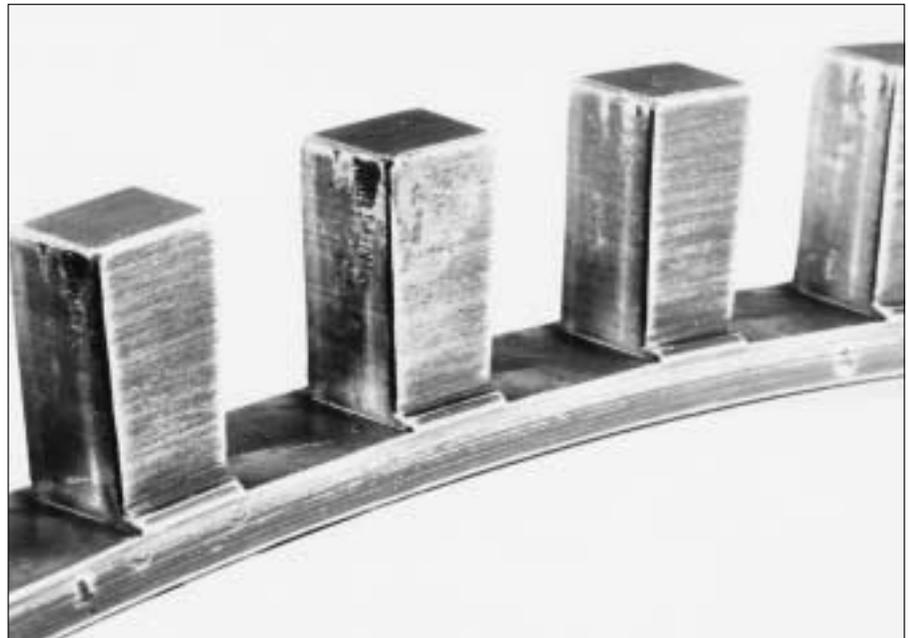
Causas:

- Lado inadmisiblemente en el apoyo, en parte debido a error de alineación
- Ajuste erróneo del juego interno del rodamiento

Medidas correctoras:

- Ajustar los rodamientos correctamente
- Emplear rodamientos autoalineables, evitar los errores de alineación

90: Desgaste en diagonal en los alvéolos de las jaulas de rodamientos de rodillos



3.5.4 Desgaste de las jaulas de rodamientos de bolas producido por desalineación

Características:

Fuerte desgaste en las costillas entre los alvéolos de la jaula; eventualmente, deformación o rotura, figura 91 (en cuanto a las huellas de rodadura, véase figura 38)

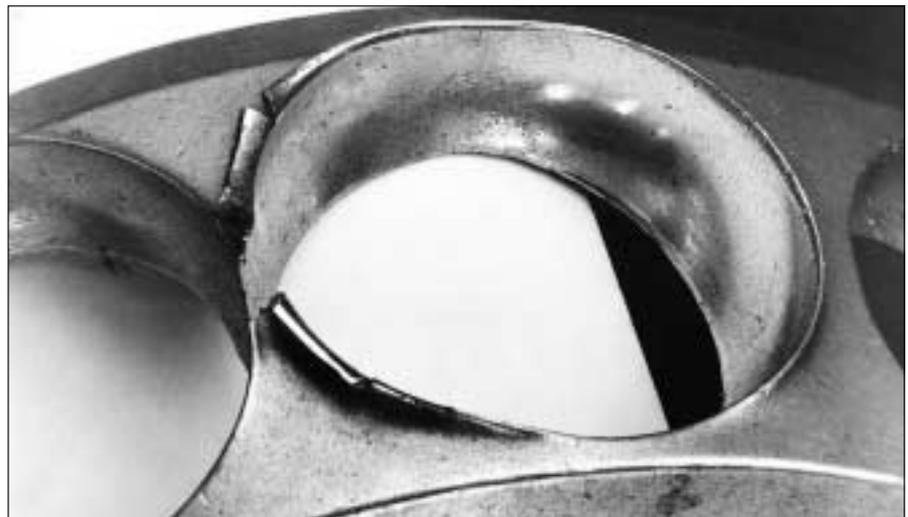
Causas:

- Lado excesivo de los aros de rodadura entre sí, p. ej., en el caso de rodamientos de bolas con carga combinada; debido a ello, distintas velocidades circunferenciales de las bolas.
- Altas sollicitaciones de la jaula en dirección circunferencial, sobre todo en el caso de mala lubricación

Medidas correctoras:

- Evitar en lo posible las desalineaciones
- En caso necesario, emplear rodamientos autoalineables o rodamientos con jaulas de poliamida.
- Construcción especial con alvéolos ovalados

91: Debido al lado de los aros entre sí, se han generado fuerzas de reacción elevadas entre las bolas y la jaula, que tendrían como consecuencia la rotura de la costilla



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Daños en la jaula

3.5.5 Rotura de las uniones de la jaula

Características:

- Aflojamiento del remachado, rotura del remachado (figura 92)
- Rotura de alvéolos de la jaula

Causas:

- Vibraciones o choques que sobrepasan las sollicitaciones normales de la jaula, p. ej. grupos con vibración o vehículos
- Ladeo en el caso de rodamientos rígidos de bolas

Medidas correctoras:

- Empleo de jaulas macizas en vez de jaulas de chapa
- Empleo de jaulas tipo ventana en el caso de sollicitaciones especialmente elevadas

92: En el caso de sollicitación por vibraciones, se puede producir la rotura de las uniones remachadas de la jaula.



3.5.6 Rotura de la jaula

Características:

Rotura de los elementos laterales de la jaula (figura 93); con menos frecuencia, rotura de las costillas

Causas:

- Daños producidos en el montaje
- Se ha sobrepasado la velocidad cinemática de giro permisible
- Como consecuencia del desgaste y por lubricación deficiente (véase apartado 3.5.1)
- Carga de momentos demasiado elevada o ladeo en rodamientos de bolas (véase apartado 3.5.4)
- En el caso de parejas de rodamientos de rodillos cónicos que están montados con un gran juego; también en el caso de cargas axiales que cambian rápidamente.

Medidas correctoras:

- Proceder con gran cuidado en el montaje.
- Filtrar el lubricante.
- Aumentar la circulación del lubricante y/o emplear otra viscosidad.
- Evitar en lo posible ladeos
- Hacer funcionar la pareja de rodamientos a ser posible con precarga

93: Rotura violenta del elemento lateral en una semijaula de un rodamiento oscilante de rodillos.



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Daños en la jaula

3.5.7 Daños producidos por un montaje incorrecto

Características:

En el caso de jaulas de poliamida, uniones por fusión; en el caso de jaulas metálicas, entallas o dobladuras, figuras 94 y 95.

Causas:

- Calentamiento inadecuado del rodamiento para el montaje
- Herramientas auxiliares de montaje inadecuadas

Medidas correctoras:

Realizar el montaje de acuerdo con las instrucciones del fabricante (véase, p. ej., publicación de FAG WL 80 100 “Montaje de rodamientos”

94: Jaula de poliamida con uniones por fusión en caso de calentamiento inadecuado del rodamiento sobre una placa de calentamiento



95: Jaula metálica con marcas de golpes



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Daños en la obturación

3.6 Daños en la obturación

3.6.1 Desgaste de los labios de obturación

Características:

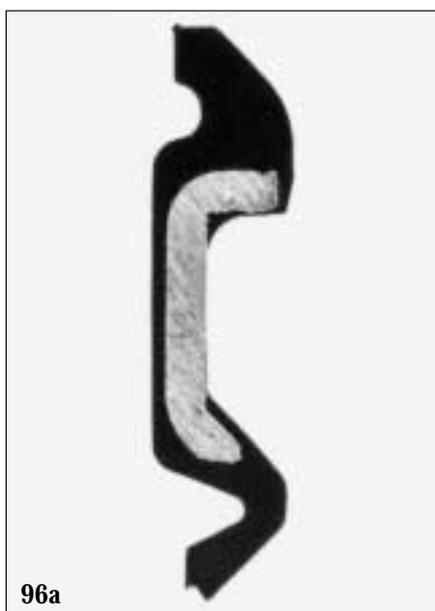
Los labios de obturación ya no están conformados como filo, sino que se han ensanchado. Grietas en el material de la obturación, labio obturador roto en parte, figuras 96, 97.

Causas:

- Temperaturas de servicio demasiado elevadas para el material de la obturación
- Acumulación extrema de humedad en el labio obturador
- Excesivo solapamiento de la obturación
- Falta de lubricante en los labios de obturación

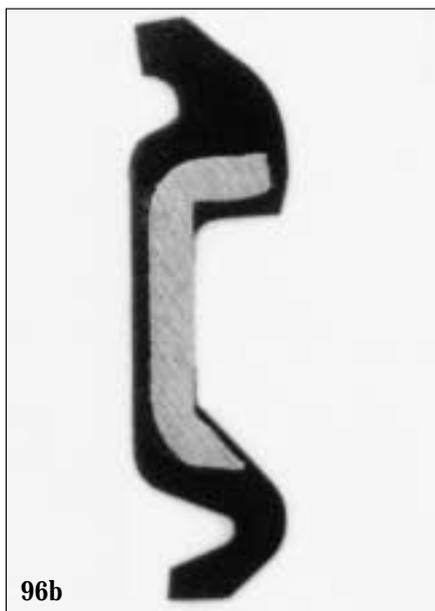
Medidas correctoras:

- Adaptar el material de la obturación a las temperaturas de servicio.
- Emplear una obturación adicional sin contacto.
- Engrasar los labios de obturación



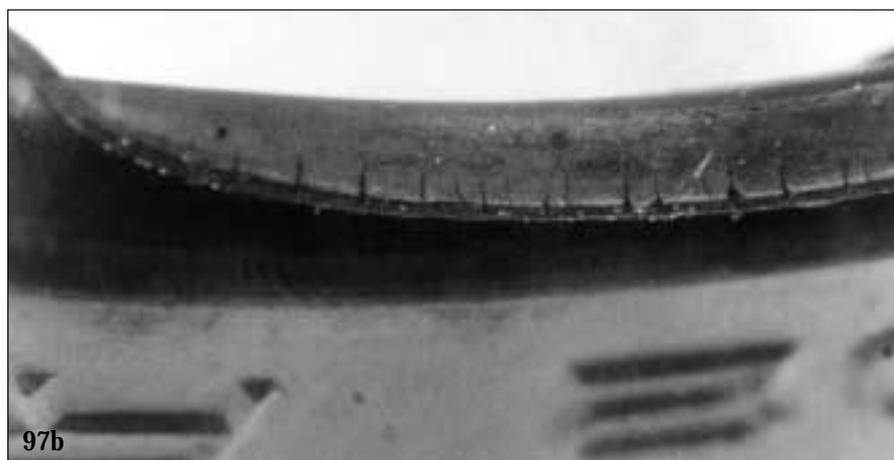
96: Sección transversal de una tapa de obturación

a: labio de obturación nuevo; b: labio de obturación gastado



97a: Obturación endurecida con desgaste y roturas

b: Detalle de un labio de obturación gastado



Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado

Daños en la obturación

3.6.2 Daños producidos por un montaje inadecuado

Características:

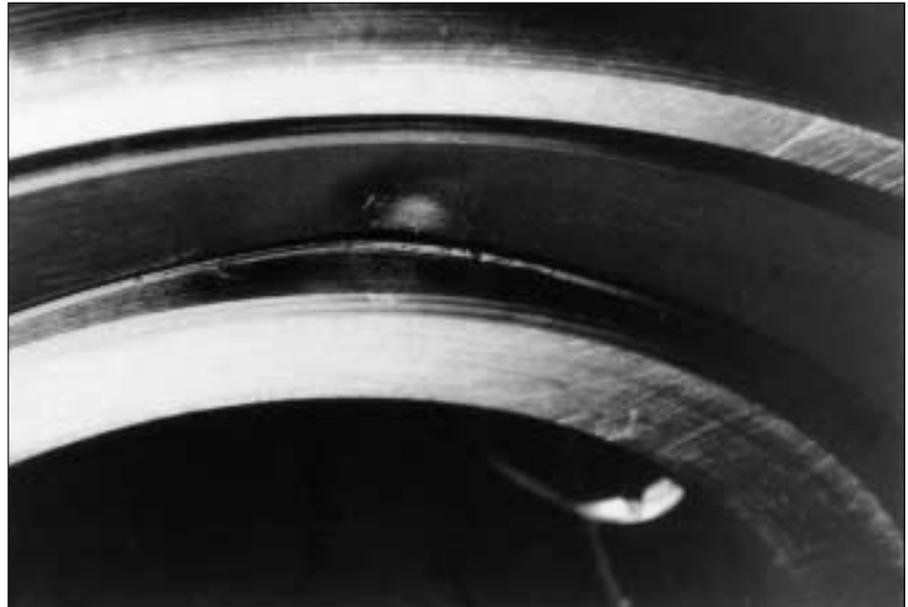
La obturación se asienta profundamente, está abollada, descolorida, arañada. Los labios obturadores están girados al revés, figuras 98 y 99.

Causas:

- Herramientas auxiliares de montaje inadecuadas
- Calentamiento excesivo del rodamiento
- Las obturaciones han sido retiradas temporalmente
- El rodamiento ha sido limpiado con aire comprimido

Medidas correctoras:

- Procurar que el montaje se realice con cuidado, empleando herramientas auxiliares adecuadas.
- No abrir nunca rodamientos provistos de obturación si todavía se van a volver a utilizar a continuación.



98: Obturación abollada con arañazos

99: Labios obturadores girados del revés



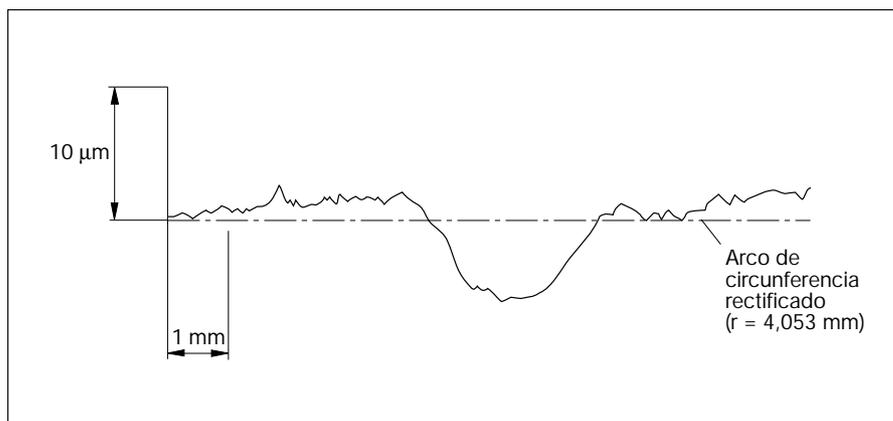
Posibilidades de investigación en FAG

Medición geométrica

4 Posibilidades de investigación en FAG

En la mayor parte de los daños de rodamientos que se dan en la práctica, las causas de estos se esclarecen a partir de un examen de las características del deterioro, unido al conocimiento de las condiciones de servicio. De los casos que quedan en principio sin explicación, la causa de los daños de una gran parte de ellos se puede esclarecer con ayuda de un estereomicroscopio. Sólo una parte muy pequeña de los fallos en rodamientos requiere una investigación más profunda de las características del deterioro y un análisis intensivo de las condiciones de empleo. Para ello, en FAG se cuenta con una gran diversidad de posibilidades de investigación de gran perfeccionamiento técnico, en parte muy específicas, que se aplican en el marco de la investigación y desarrollo. Como estas investigaciones también pueden requerir un gran coste, antes de su aplicación se ha de considerar cuidadosamente si el beneficio obtenido compensa los costes.

En las siguientes secciones se presentan las principales áreas de investigación con ayuda de algunos ejemplos.



100: Forma del perfil del camino de rodadura de un rodamiento rígido de bolas con estrías de desgaste (curvatura del camino de rodadura compensada por el aparato de medición)

101: Aparato de medición de forma Talysurf

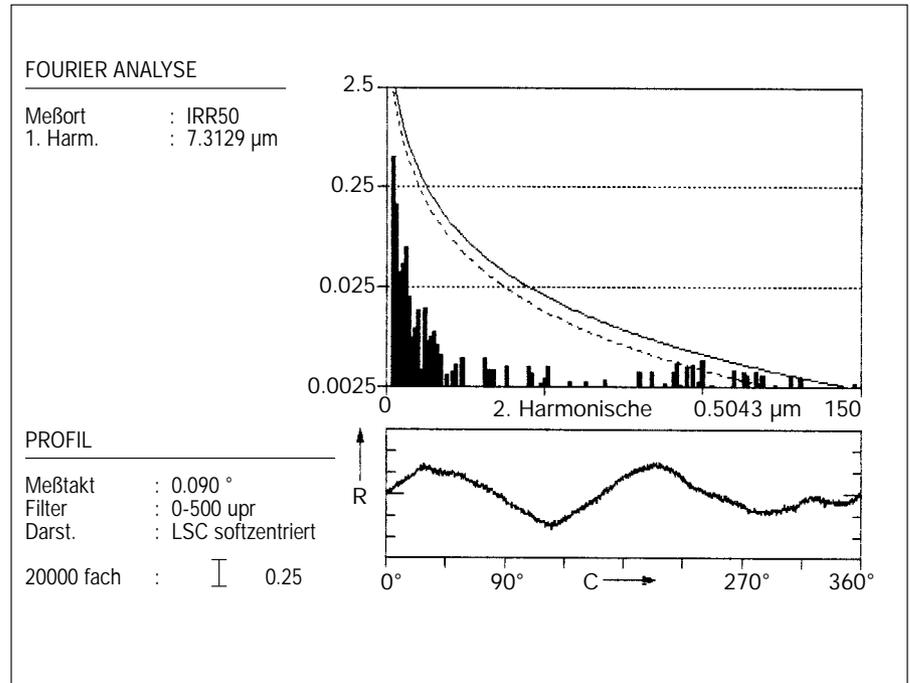
4.1 Medición geométrica de rodamientos o piezas de rodamientos

FAG se esfuerza continuamente por aumentar la calidad de fabricación de los rodamientos. Para ello, con objeto de asegurar la calidad tanto in situ como en un laboratorio propio, disponemos de un excelente equipamiento con los instrumentos de medición más diversos para el control de medidas y de formas:

- Medición de longitudes y diámetros con precisión micrométrica
- Verificación de contornos de forma y de radio con una ampliación de hasta 100 000 aumentos, figuras 69, 100 y 101



- Control de la redondez con una ampliación de hasta 100000 aumentos, incluyendo análisis de la frecuencia de onda, figuras 102 y 103



102: Registro de la medida de redondez con análisis de la frecuencia de onda

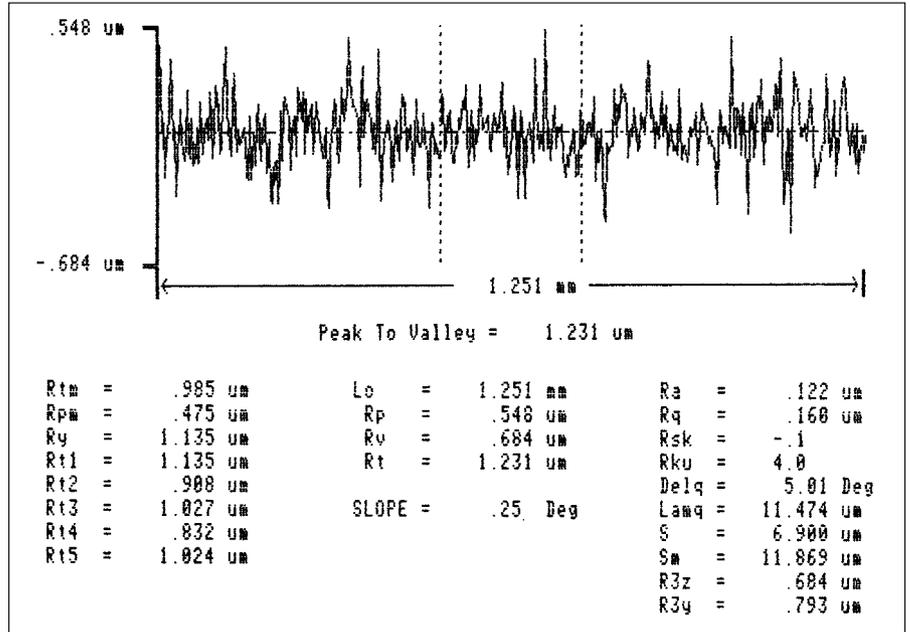


103: Sistema de medición de forma

Posibilidades de investigación en FAG

Medición geométrica

- Mediciones de la rugosidad hasta la centésima de micrómetro, figura 104
- Control de tolerancias de forma y de posición en sistemas de medición de forma (FMS) y máquinas de medición de coordenadas, incluso en piezas constructivas de forma muy irregular, como p. ej. alojamientos de fundición, figura 105
- Verificación de valores de juego interno de rodamientos y precisiones de giro en piezas individuales



104: Registro de la medida de rugosidad con valores característicos



105: Máquina de medición de coordenadas

4.2 Análisis y ensayos de lubricantes

Para la investigación de la calidad y la aptitud de los lubricantes para el empleo en rodamientos, FAG mantiene laboratorios y un campo de ensayos. Análisis de laboratorio de lubricantes procedentes de rodamientos averiados proporcionan a menudo las informaciones decisivas para el esclarecimiento de la causa del fallo. Entre las posibilidades de investigación más importantes se cuentan las siguientes:

- Cantidad y clase de impurezas
 - sólidas, figura 106
 - líquidas (humedad)
- Utilización de antioxidante
- Envejecimiento
- Variación de la viscosidad
- Contenido de aditivos (disminución/degradación)
- Relación aceite/jabón en grasas
- En muchos casos, también determinación del tipo y clase de lubricante, p. ej., para la identificación de mezclas de lubricantes en el reengrase.

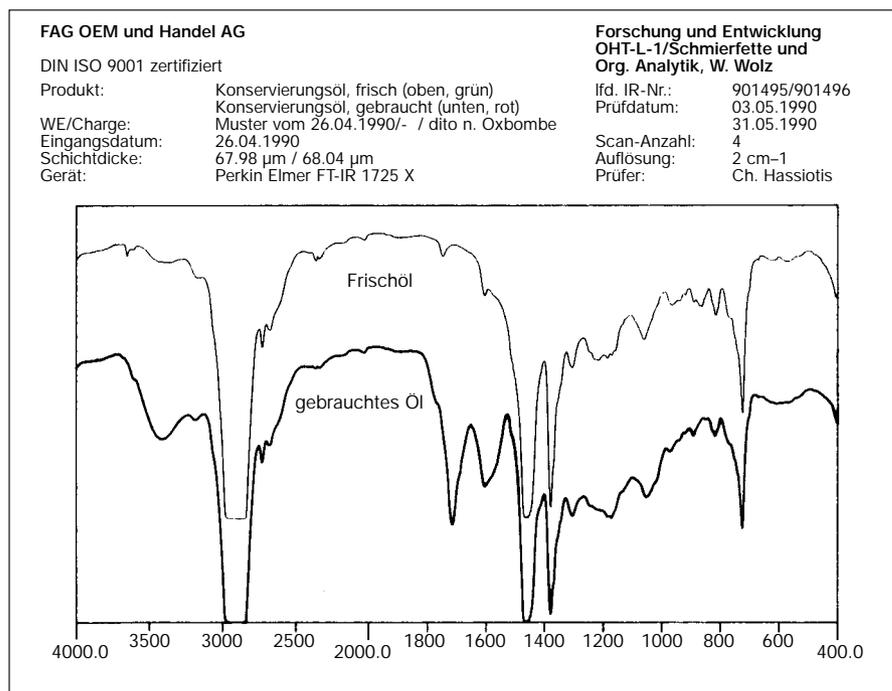
Sin embargo, para obtener informaciones fiables en base al estudio de lubricantes, el principal requisito es una toma de muestras adecuada (véase sección 2.2). A partir de los resultados de los análisis de impurezas se puede deducir casi siempre su origen. Así, por ejemplo, se obtienen datos indicativos directos sobre posibles medidas contra el desgaste. Asimismo, a partir del conocimiento del estado general de un aceite o una grasa tras un determinado tiempo de servicio se puede llegar a conclusiones sobre los plazos adecuados de cambio de aceite o de reengrase.

106 a: Investigación de contaminantes, análisis ICP-AES

| Element | Wellenlänge | Faktor | Offset | Tiefprobe min | Tiefprobe max | Hochprobe min | Hochprobe max |
|----------|-------------|--------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Kobalt | 228,616 | 1,673 | 268 | 962 | 415 | 179515 | 107157 |
| Mangan | 257,610 | 1,318 | -76 | -121 | -34 | 67816 | 51496 |
| Chrom | 267,716 | 1,476 | 381 | 669 | 195 | 76696 | 51688 |
| Kupfer | 324,754 | 0,834 | -471 | 80 | 660 | 2297 | 3316 |
| Molybdän | 281,615 | 1,073 | -17 | 89 | 99 | 47781 | 44543 |
| Nickel | 231,604 | 1,778 | 4 | 114 | 62 | 38487 | 21640 |
| Vanadium | 311,071 | 0,937 | -37 | 5 | 45 | 64228 | 68560 |
| Wolfram | 400,875 | 0,742 | -16 | 4 | 26 | 14129 | 19053 |
| Silicium | 251,611 | 2,173 | 310 | 509 | 92 | 2385 | 955 |

| Probe: Verunreinigungen in Schmierstoffen | | | | | Methode: Stahl 1 M(3) | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|---------|
| | Co | Mn | Cr | Cu | Mo | Ni | V | W | Si |
| x | .0107 | 0.636 | 1.412 | 0.185 | 0.797 | 0.271 | .327 | .002 | 0.359 % |
| s | .0004 | .0002 | .011 | .0002 | .0032 | .0063 | .0007 | .0099 | .0006 |
| sr | 4.11 | 0.67 | 0.03 | 1.18 | 0.40 | 2.31 | 0.22 | 57.44 | 0.06 |

106 b: Análisis de lubricante FT-IR



Posibilidades de investigación en FAG

Análisis y ensayos de lubricantes

De vez en cuando, en casos especiales de aplicación se emplean también nuevos lubricantes, desconociendo su aptitud para la lubricación de rodamientos. Para comprobar las propiedades de tales grasas y aceites se han desarrollado en FAG bancos de pruebas, que se han ido normalizando y se emplean también en la industria de los lubricantes para el estudio de nuevos productos, figura 107.

107: Banco de pruebas para la determinación de la calidad de los lubricantes



4.3 Control del estado del material

El estado del material de todas las piezas de un rodamiento es de importancia decisiva si se desea que el rodamiento alcance su máximo rendimiento. Si bien son muy poco frecuentes en los rodamientos los deterioros debidos a defectos del material o de fabricación, véase figura 11, sin embargo, en casos de duda, un ensayo de material puede proporcionar información al respecto. En una serie de casos se producen también variaciones del estado del material debido a condiciones de servicio del rodamiento imprevistas.

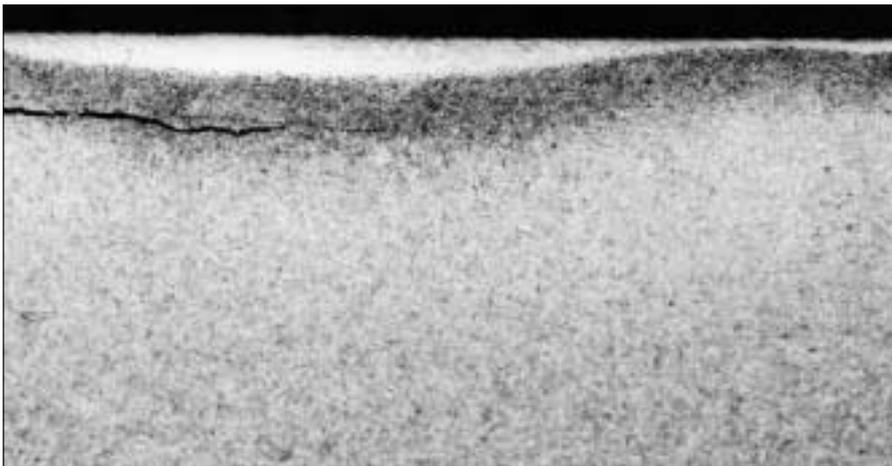
Las principales inspecciones en esta área son:

- Ensayo de la dureza, con menos frecuencia, también la resistencia a la tracción o resiliencia
- Valoración metalográfica de la estructura

- Visualización de zonas de calentamiento inadmisibles de las superficies de contacto mediante ácido
- Comprobación de fisuras por medio de ultrasonidos o corriente parasitaria
- Medición radiográfica del contenido de austenita residual
- Inspección del grado de pureza del material
- Análisis de material

Además de la detección de defectos de material, con estos estudios se pueden encontrar, p. ej., datos indicativos de estados de deslizamiento inadmisibles (zonas de calentamiento por deslizamiento, figura 108) o temperaturas de servicio inesperadamente elevadas (variación de la estructura de los componentes durante el servicio y, a consecuencia de ello, variaciones dimensionales).

108: Sección de la zona de influencia del calor



Posibilidades de investigación en FAG

Análisis radiográfico de la microestructura

4.4 Análisis radiográfico de la microestructura

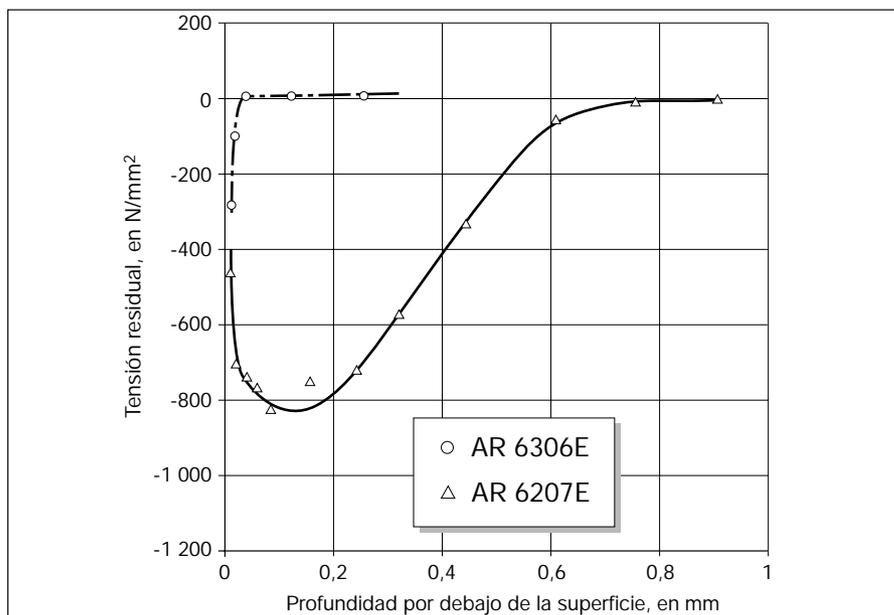
La determinación radiográfica de la estructura reticular (véase medición del contenido residual de austenita, en la sección 4.3), proporciona también importantes informaciones sobre las tensiones propias “congeladas” en el material y sobre las sollicitaciones debidas a ellas. De esta forma, en casos de deterioro especialmente críticos, cuando la situación de carga efectiva no es registrable por cálculo, se puede determinar con buena aproximación la carga efectiva en rodamientos gastados por el servicio. Sin embargo, es condición indispensable para ello que las sollicitaciones específicas del camino de rodadura alcancen un nivel de aproximadamente 2.500 N/mm^2 durante un tiempo relativamente largo, pues sólo por encima de este nivel de carga se producen deformaciones plásticas del retículo del material que se puedan detectar o cuantificar por medio de difracción de rayos X, figura 109. Una explicación detallada del modo de funcionamiento de esta determinación de las tensiones propias y de la determinación de la sollicitación se encuentra, p. ej., en el artículo “Schadensuntersuchung durch Röntgenfeinstrukturanalyse” (Investigación de daños por análisis radiográfico de la estructura), en “Schadenskunde im Maschinenbau”, Expert Verlag 1990. Veamos a continuación un breve resumen.

A partir de los dilatamientos de retículos medidos por difracción de rayos X se pueden deducir las tensiones residuales puntuales (en una superficie del orden de un milímetro cuadrado, y una profundidad del orden de $1/100$ de milímetro) existentes. Mediante erosión electroquímica de la superficie, la medición se realiza por capas para distintas profundidades por debajo del camino de rodadura de un aro de rodamiento. Se obtiene una evolución del mismo tipo que la representada en la figura 110. A partir de la profundidad total de la deformación y de la profundidad en la que aparece el máximo de tensión se puede deducir, por una parte, la carga máxima externa, y, por otra, el porcentaje de una posible sollicitación por deslizamiento en el camino de rodadura. A veces, estos son importantes datos indicativos de las causas del deterioro, sobre todo si los valores medidos se desvían notablemente de los esperados mediante cálculo.

109: Dispositivo para el análisis radiográfico de la microestructura



110: Curva de la tensión residual, determinada con ayuda del análisis radiográfico de la microestructura; elevado componente tangencial de fuerza en el aro exterior 6207E; ningún aumento de sollicitación en el rodamiento de referencia 6303E



Posibilidades de investigación en FAG

Investigaciones por microscopía electrónica de barrido

4.5 Investigaciones por microscopía electrónica de barrido (SEM)

Por lo general para la investigación de daños se emplea en principio, además de la observación a simple vista, un estereomicroscopio, a fin de poder reconocer las distintas características de los fallos. Sin embargo, en algunos casos, los detalles que son importantes para el deterioro son muy pequeños. Debido a la longitud de onda relativamente grande de la luz visi-

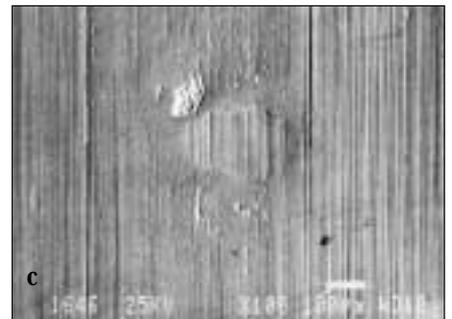
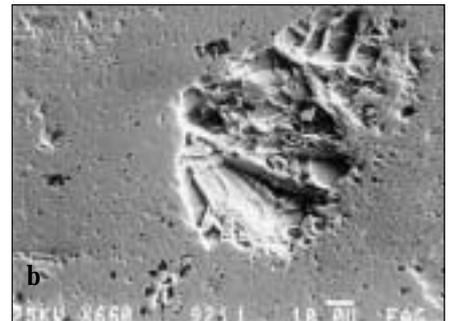
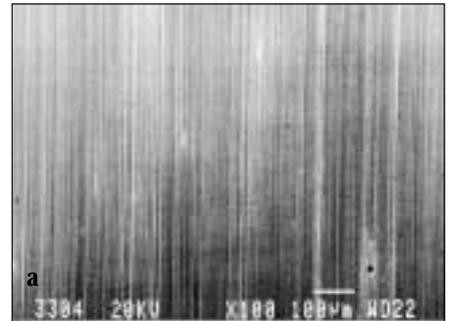
ble, la definición en profundidad está limitada por las representaciones ópticas. Por lo tanto, en las condiciones de irregularidad superficial habituales de los caminos de rodadura de rodamientos dañados, se obtienen imágenes nítidas sólo hasta una ampliación de aproximadamente 50 aumentos. Este obstáculo en la observación óptica de superficies se salva con la obtención de imágenes por medio de haces electrónicos de longitud de onda muy corta en el microscopio electrónico de barrido (MEB). Gracias a ello, la ca-

pacidad de reconocer detalles aumenta en muchos miles, figura 111.

Así pues, el microscopio electrónico de barrido es con frecuencia un importante instrumento auxiliar para la investigación visual precisa de caminos de rodadura desgastados o dañados por el paso de corriente, superficies de rotura, impresiones de cuerpos extraños o inclusiones de material, figuras 112a b y c.

112: Fotografías de estructura superficial obtenidas con el SEM a diferentes aumentos.
a: camino de rodadura intacto;
b: impresiones de cuerpos extraños duros
c: Daños por fatiga en su fase inicial

111: Microscopio electrónico de barrido

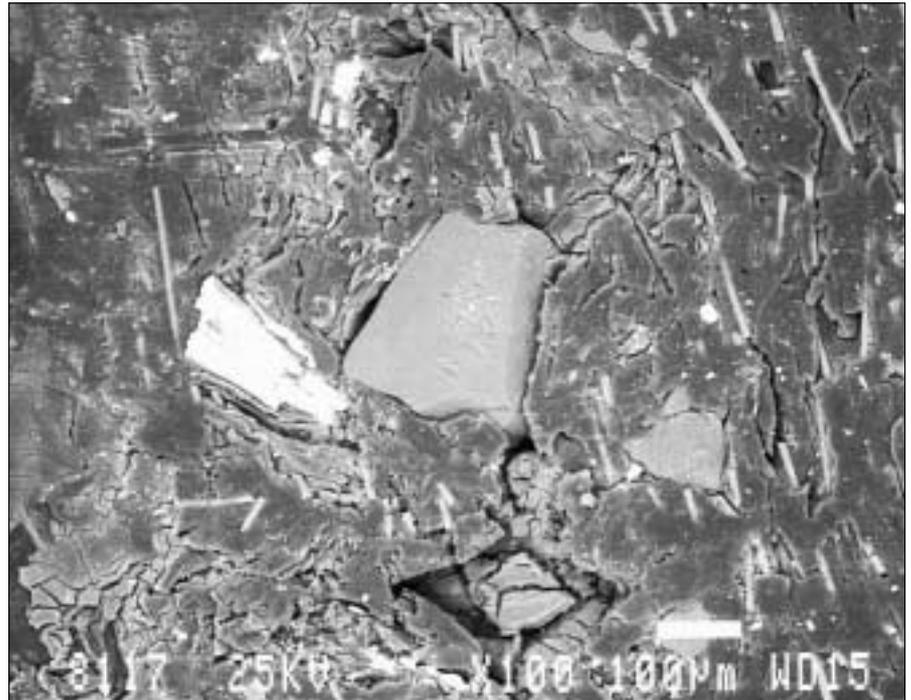


Posibilidades de investigación en FAG

Investigación por microscopía electrónica de barrido

Además, si se usan también espectrofotómetros en combinación con el MEB existe la posibilidad de realizar lo que se denomina un microanálisis por haz electrónico. Con este procedimiento se puede investigar la composición del material en una zona de volumen de aproximadamente 1 mm³. Esto resulta útil, p. ej., cuando todavía están introducidos restos de cuerpos extraños en los alvéolos de la jaula de un rodamiento, y es preciso esclarecer su origen, figuras 113a y b. Otras posibilidades de empleo son la comprobación de revestimientos o de capas reactivas sobre las superficies de contacto, o el control de la composición del material en la zona microscópica.

113: Microanálisis de cuerpos extraños.
a: cuerpos extraños en el puente de la jaula



113b: Composición del material de los cuerpos extraños



4.6 Ensayos de componentes

En el área de desarrollo de FAG se emplean un gran número de bancos de pruebas para la verificación de la capacidad de rendimiento de productos de nuevo proyecto. En algunos casos, ensayos de este tipo pueden ser también aprovechados para el esclarecimiento de la causa del deterioro de un rodamiento. Se pueden mencionar aquí, por una parte, ensayos directos en grupos de los clientes, p. ej. mediciones de la deformación o de la vibración en máquinas, pero por otra parte, también ensayos de estanqueidad, mediciones del momento de fricción o ensayos de duración en bancos de pruebas, figuras 114 y 115. Los ensayos se realizan en condiciones definidas, en las que los resultados esperados son previsibles con un alto grado de fiabilidad. Si los rodamientos satisfacen las exigencias en el experimento, la investigación debe concentrarse a partir de entonces en la comprobación de las condiciones de servicio efectivas (cargas adicionales inesperadas, esfuerzos de montaje, etc.). En caso de que los rodamientos fallen tras tiempos de marcha inesperadamente cortos, los bancos de pruebas, gracias a sus dispositivos técnicos de vigilancia, ofrecen la posibilidad de reconocer daños en la primera fase de formación, lo que en la práctica representa con frecuencia un problema, pero que a menudo resulta decisivo para la localización de las causas.

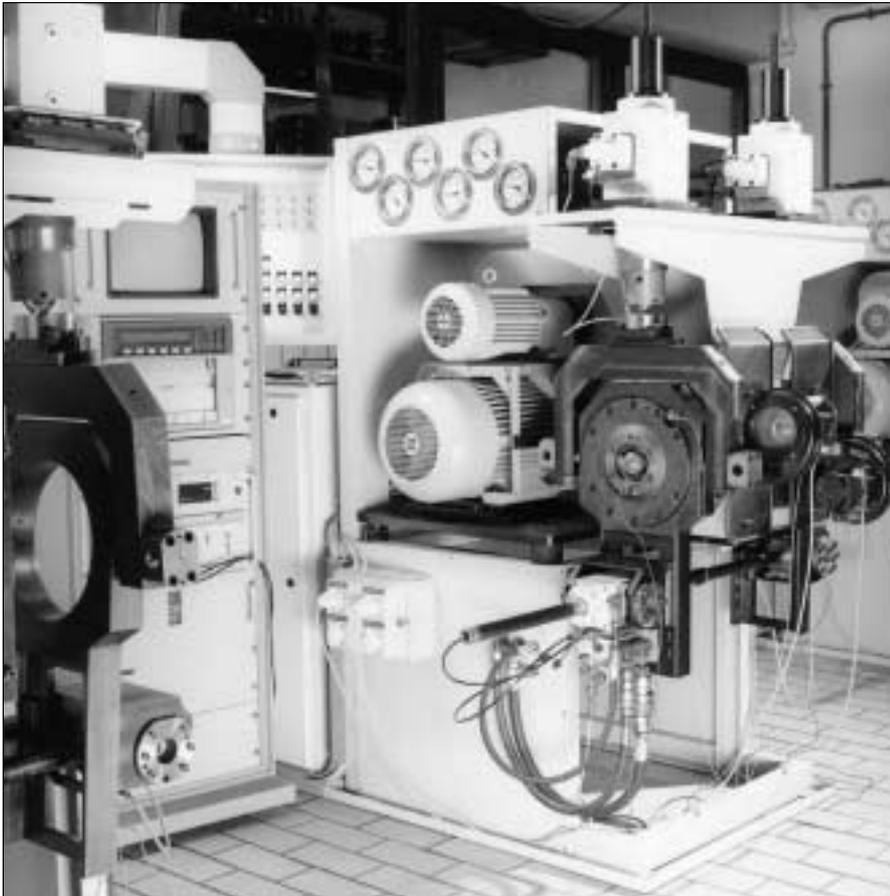
114: Banco de pruebas para el ensayo de la eficacia de obturaciones en rodamientos



Posibilidades de investigación en FAG

Ensayos de componentes

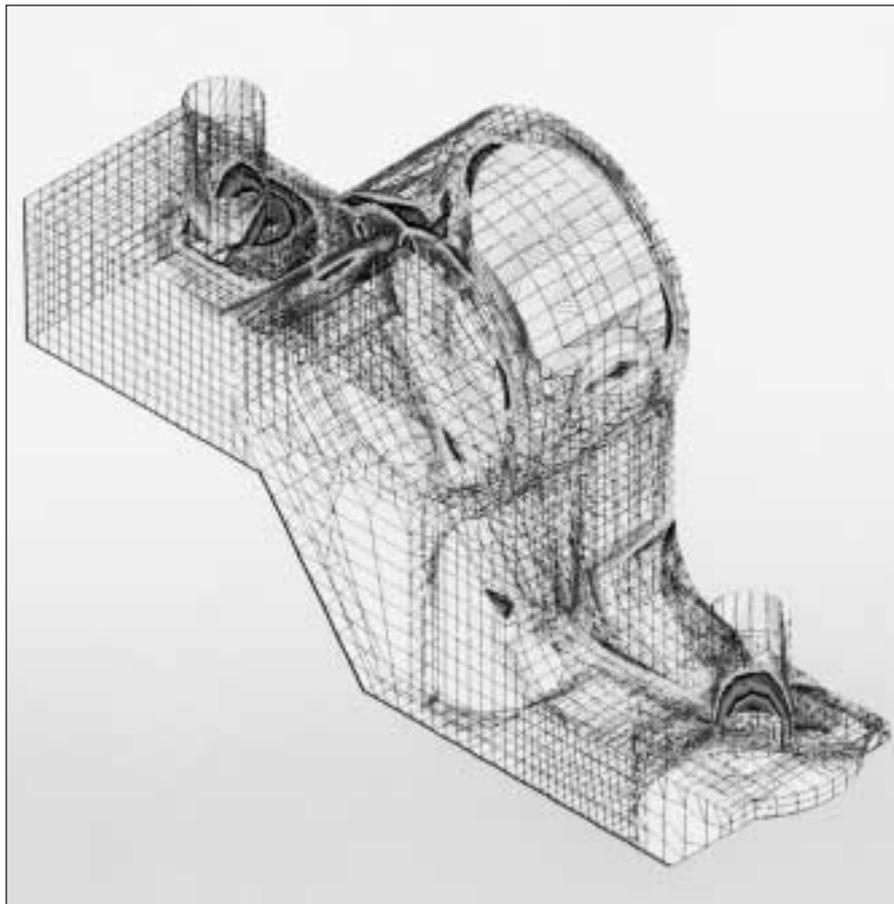
115: Banco de pruebas para la simulación de las sollicitaciones de servicio en rodamientos de ruedas de automóviles



4.7 Comprobación por cálculo de las condiciones de carga

En muchos casos, en construcciones nuevas, debido a experiencias con grupos similares más antiguos se prevén rodamientos cuya situación de carga no se conoce en detalle. Si más tarde se producen daños en los rodamientos, a menudo resulta útil una comprobación más exacta por cálculo de las condiciones de montaje para la localización de la causa. En este sentido es especialmente importante una comparación de la duración esperada por cálculo con la conseguida efectivamente, así como el control por cálculo de las condiciones de lubricación. Para ello se dispone en FAG de una amplia gama de programas de cálculo, con los cuales se pueden determinar, también en el caso de rodamientos sofisticados, los valores para la carga externa del rodamiento, el ladeo entre los aros en el montaje, las sollicitaciones internas, procesos cinemáticos desarrollados en el interior de un rodamiento, deformaciones de las piezas del entorno, curvas de temperatura y otros valores similares. La complejidad de los programas abarca desde la simple valoración de fórmulas analíticas, pasando por la realización de una gran diversidad de iteraciones numéricas para soluciones aproximadas no lineales, hasta extensos cálculos tridimensionales de resistencia mediante el método de elementos finitos, figura 116.

116: Determinación de tensiones en una caja de grasa con ayuda del método de los elementos finitos (FEM)



Notas

FAG Sales Europe GmbH - España

Una filial del Grupo FAG Kugelfischer

Centre de Negocis Can Castenyer

Ctra. de Rubí, 88 Plta. 1 A

E-08190 Sant Cugat del Vallès (Barcelona)

Teléfono: +34 93 590 65 00

Telefax: +34 93 675 93 90

E-mail: fag_esp@es.fag.com

<http://www.fag.com>

Todos los datos han sido elaborados y comprobados cuidadosamente. No podemos asumir responsabilidad alguna por eventuales errores o faltas.

Nos reservamos el derecho de cambios en interés del desarrollo técnico.

© por FAG 2002. La reproducción, total o parcial, esta prohibida sin la autorización del propietario.