



HAL
open science

The progression of early dents on ball surface of a hybrid ball bearing and study of vibration behaviour of the bearing under high-speed conditions

Salma Berrada, Roger Serra, Céline Chastagner

► To cite this version:

Salma Berrada, Roger Serra, Céline Chastagner. The progression of early dents on ball surface of a hybrid ball bearing and study of vibration behaviour of the bearing under high-speed conditions. 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280062

HAL Id: hal-04280062

<https://hal.science/hal-04280062>

Submitted on 13 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Effets de défauts précoces sur la surface de billes céramiques sur le comportement vibratoire du roulement hybride en condition de hautes vitesses de rotation

Salma BERRADA^{a, b, c}, Roger SERRA^{b, c}, Céline CHASTAGNER^a

a. SKF France,

b. Institut National des Sciences Appliquées Centre Val de Loire,

c. Laboratoire de Mécanique Gabriel Lamé - EA 7494, Blois, France

salma.berrada@insa-cvl.fr

roger.serra@insa-cvl.fr

Celine.chastagner@skf.com

Résumé :

Les roulements rigides à billes (DGBB) sont très utilisés dans les équipements tournants dans de nombreux domaines parmi lesquels nous avons le Powerpack des véhicules électriques, donc très exigeant en termes de bruit et de vibrations.

La conception géométrique, le jeu, le matériau des composants et les propriétés du lubrifiant influencent le comportement vibratoire et le cycle de vie des roulements. De plus, les performances des roulements dépendent fortement de la qualité de la surface de contact (chemins de bagues et surface des billes). Dans un roulement rigide à billes, la qualité de la surface de contact résulte de plusieurs processus de fabrication et affecte directement les niveaux de bruit et de vibrations générés par le roulement dans l'application.

Lors du fonctionnement, des surfaces de contact sont créées entre les billes et des chemins de bagues, appelées contacts hertziens. Il est connu que tous les roulements rigides à billes génèrent des vibrations en raison des irrégularités sur les surfaces de contact (Hertz, 1881). Sous des vitesses de rotation et des conditions de charge élevées, les contacts hertziens cycliques peuvent entraîner la fatigue de contact sur les composants (fissures, écaillage, indentations...). Certaines imperfections de fabrication, même à des stades précoces sur les surfaces de contact, peuvent aggraver ce problème et entraîner un niveau de bruit et vibrations élevés.

En outre, une large gamme de composants différents peut être utilisée pour les roulements rigides à billes afin de répondre aux besoins des applications. La différence de matériau affecte le comportement vibratoire du roulement. C'est le cas des billes en céramique et en acier.

Cet article étudie la progression de défauts précoces sur billes en céramique sous des vitesses de rotation élevées et différentes conditions de charge et étudie l'effet des défauts de billes en nitrure de silicium sur le comportement vibratoire du roulement. Des essais expérimentaux ont été réalisés pour étudier l'évolution des défauts des billes céramiques dans des conditions de vitesse de rotation et de charge élevées. A ce stade précoce, la dimension des défauts est principalement de l'ordre du μm . Cependant, la différence de dureté de surface des composants du roulement et la taille des défauts ont un impact majeur sur les vibrations du roulement.

Abstract:

Deep groove ball bearings (DGBB) are widely used in rotating equipment in many fields among which we have electric vehicle Powerpack, so very demanding in terms of noise and vibration.

Geometrical design, clearance, component material, and lubricant properties influence vibratory behavior and bearing life cycle. Also, bearing performance highly depends on contact surface quality (Ring races and balls surface). In a ball bearing, contact surface quality results from several manufacturing processes (heat treatment, turning, grinding, honing and assembly) and directly affects the noise and vibration levels generated by the bearing in the application. When operating, contact surfaces are created between balls and rings path, called Hertzian contacts. It is known that even compliant deep groove ball bearings will generate vibrations due to the irregularities on contact surfaces (Hertz, 1881). Under high rotation speeds and load conditions, cyclic Hertzian contacts may lead to components contact fatigue (cracks, spalling, indentation ...). Some manufacturing imperfections, even at early stages on contact surfaces may aggravate this issue and lead to high noise and vibrations in the application. For this reason, the SKF manufacturing process aims to reduce bearings noise and vibration levels and ensure the optimum life of the application.

For their insulating property, ceramic balls are increasingly used in the applications. This paper investigates early ceramic ball dents progression under high rotation speeds and different load conditions and study the vibratory behavior of the bearing under different operating conditions. Experimental tests were carried out to study the evolution of ceramic ball defects under high rotation speed and load conditions. At this early stage, faults dimension is mainly at the μm range. However, the difference of bearing components surface hardness and defect size has major impact on bearing vibration.

Mots clés : roulement à billes céramique, dynamique du roulement, vibration, défauts précoces.

1 Introduction

Il est connu que sous des conditions de charge et de vitesse, un roulement à billes se comporte comme un système vibratoire non linéaire. Des contraintes hertziennes non linéaires apparaissent à cause de l'aspect irrégulier des surfaces de contact entre billes et chemins de bagues. En d'autres mots, la qualité de surface et déviations de formes sur les zones de contact des composants du roulement affectent le comportement vibratoire du roulement. Il est généralement admis que les processus d'usinage des chemins de bagues de roulements, de fabrication de billes et d'assemblage peuvent entraîner des imperfections de surface des composants telles que l'ondulation, la rugosité, les rayures superficielles locales, les cracks, les coups, la porosité, les particules, etc. Les fabricants de roulements améliorent continuellement leurs procédés de finition de surface pour éliminer ces défauts. Cependant, en pratique, il n'est pas facile d'éliminer les défauts à l'échelle du micron ou sous-micron.

Dès les années 60, les billes céramiques présentant plus de précision à la fabrication, et aussi pour leurs propriétés mécaniques, ont été une bonne alternative pour limiter les frottements aux contact hertziens et améliorer la durée de vie du roulement.

En raison de leurs performances, les roulements hybrides sont de plus en plus utilisés, en particulier sur les applications à grande vitesse telles que les moteurs d'avion, les machines de super précision, les moteurs de véhicules électriques, etc. Les contacts hybrides sont plus résistants aux conditions de lubrification marginales ou réduites, à l'environnement corrosif et à la contamination. Également pour la propriété isolante, la faible génération de chaleur, le faible poids et la rigidité supérieure des billes en nitrure de silicium, les roulements hybrides ont une durée de vie plus longue et des niveaux de

vibrations inférieurs par rapport aux roulements entièrement en acier. De nombreuses études depuis les années 1960 couvrent la caractérisation des billes en céramique et les modes de défaillance des roulements hybrides. Cependant, Il est connu que les matériaux céramiques se comportent comme des alliages métalliques à haute résistance qui résistent à une forte compression mais sont fragiles sous traction [1]. Cette caractéristique rend les billes céramiques cassantes et très sensibles à la traction ou aux impacts, et particulièrement sensibles à la rupture prématurée en raison de l'évolution précoce des défauts avec propagation des fissures et fatigue de contact sous contrainte de traction cyclique [1-16]. Mian Hammad Nazir, Zulfiqar Ahmad Khan et Adil Saeed ont étudié l'un des défauts de fabrication parmi les plus présents sur des billes de nitrure de silicium « C-cracks », en fonction de la taille de la fissure en C et de l'angle de sollicitation, ce type d'imperfections est l'une des causes principales de la défaillance prématurée des billes céramique. MH Nazir et al. ont étudié l'effet des paramètres de la fissure : position latérale, orientation, géométrie de la fissure et pression de contact, sur la probabilité de défaillance des billes céramique, et ont conclu que la taille de la fissure, l'angle et la ténacité du matériau de la bille ont un impact important sur la propagation de la fissure [2]. Hadfield M. a étudié la rupture des rouleaux en céramique nitrurée avec des fissures sur les chemins de bagues [3]. De nombreux autres types d'imperfections de surface peuvent être trouvés sur les billes céramiques nouvellement fabriquées comme les défauts en étoile, la porosité, les marques de contact, les encoches en V ou les défauts de matériau manquant étudiés par Junbiao Lai, Yuri Kadin et Charlotte Vieillard [4], etc. Le présent article étudie l'effet d'une autre imperfection de procédé de fabrication des billes céramiques appelée « Cuts » (Figure 1) avec une longueur de défaut initiale comprise entre 30 et 90 μm et une profondeur de 2 à 4 μm , sur le comportement des vibrations des roulements dans différentes conditions de vitesse et de charge. De nombreuses inspections de surface et de matériaux ont été effectuées sur de nouvelles billes céramiques pour étudier la qualité de surface et les propriétés des matériaux avant l'assemblage des roulements. Ensuite, les roulements ont été montés sur un banc de test à grande vitesse pour analyser l'impact sur le comportement vibratoire du roulement sous ces conditions de vitesse élevée.

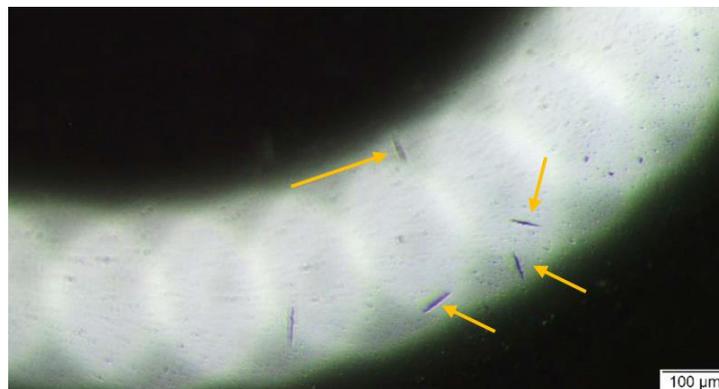


Figure 1. Bille Céramique avec des 'Cuts'

2 Dynamique du roulement

Lorsqu'il est soumis à une charge externe, un DGBB présente des déformations élastiques aux contacts entre les chemins de bagues et les billes. En fait sous charge, en raison de la déformation élastique, une zone de contact infinitésimale est créée. Il s'agit de la pression hertzienne.

En raison de la non-linéarité des contraintes de contact hertziennes entre les billes et les chemins de bagues, ces contacts peuvent être modélisés par des ressorts non linéaires, de sorte que le roulement en rotation sous charge se comporte comme un système vibratoire non linéaire.

Plusieurs travaux ont été développés autour de modèles dynamiques de roulements, dès le début du XX^{ème} siècle avec les travaux de Hertz et Weibull. Les premiers modèles étant simplifiés, ne

considèrent pas la flexibilité des composants, les effets de jeux radiaux, la lubrification aux contacts, les effets de la cage, etc. Palmgreen [19] présente le roulement sous forme de système de ressorts linéaire avec une rigidité équivalente constante. Ensuite, plusieurs travaux plus récents se sont intéressés aux aspects de non-linéarité des contacts, avec l'évolution des modèles analytiques prenant en compte la flexibilité des bagues, les forces exercées par les bagues sur les éléments tournant, les angles de contacts, ainsi que les calculs de rigidités et amortissements à chaque contact en fonction du temps [19-24]. Ainsi, la conception géométrique, le jeu, les propriétés du matériau, le type de traitement thermique (niveau de dureté et microstructure), les propriétés et l'épaisseur du lubrifiant, les conditions de fonctionnement, etc. ont un impact majeur sur le comportement vibratoire du roulement. Du fait de l'impact de chacun de ces paramètres sur la raideur de l'ensemble du roulement.

Le comportement dynamique dépend non seulement des forces d'excitation, mais aussi de la fréquence d'excitation. A chaque passage de bille sur un défaut de surface, une impulsion correspondant à la force d'excitation est générée. La fréquence de détection de ces impulsions dépend des fréquences de rotation des composants du roulement à billes et du nombre de billes dans le roulement.

Les fréquences d'excitation d'un roulement à billes sont données comme suit :

- Fréquence de défaut de la bague intérieure (BPFI), c'est la fréquence à laquelle la bille passe sur un défaut sur le chemin de la bague intérieure.
- Fréquence de défaut de la bague extérieure (BPFO), elle correspond au passage de la bille sur un défaut sur le chemin de la bague extérieure.
- Fréquence de défaut de billes, si le défaut rencontre la bague extérieure et la bague intérieure (sachant que ce n'est pas forcément le cas) cela se produit deux fois en un tour. Donc, par définition, la fréquence de défauts sur billes correspond à deux fois la fréquence de rotation des billes (BSF)
- Fréquences propres aux ondulations -déviations de forme- sur chaque composant du roulement

Cet article couvrira principalement les défauts des billes en céramique et leur effet sur le comportement vibratoire du roulement dans les chapitres suivants.

3 Échantillons de billes et procédures de test

3.1 Échantillons de billes

Les billes de nitrure de silicium utilisées dans la présente étude sont de grade Si₃N₄, testées selon les normes des matériaux céramiques ISO 26602 [25]. Des tests de caractérisation des matériaux et une inspection de surface ont été effectués avant l'assemblage des roulements.

3.1.1 Propriétés des matériaux et mesures dimensionnelles

Les propriétés du nitrure de silicium des billes utilisées sont les suivantes :

- Densité : 3236 Kg/m³
- Dureté Vickers HVA : 1514 Kg/mm²
- Résistance à la rupture par indentation KIC : 7,5 MPa.m^{1/2}

Les résultats des mesures de densité, de dureté et de résistance à la rupture par indentation calculées en tenant compte des normes ISO des matériaux céramiques ont montré que toutes les valeurs répondent à la classe de matériaux I. De plus, les mesures dimensionnelles ont montré que tous les échantillons étaient dans la tolérance, en termes de rugosité de surface, d'arrondi et écarts de forme.

3.1.2 Inspection de la surface de billes

L'inspection de surface a révélé quelques impacts dus aux processus de finition et d'emballage. De grandes marques de contact comme le montre la figure 2 ont été trouvées sur plusieurs billes. Cependant, les marques de contact sont considérées comme non critiques dans l'application sur la base d'expérience précédente.

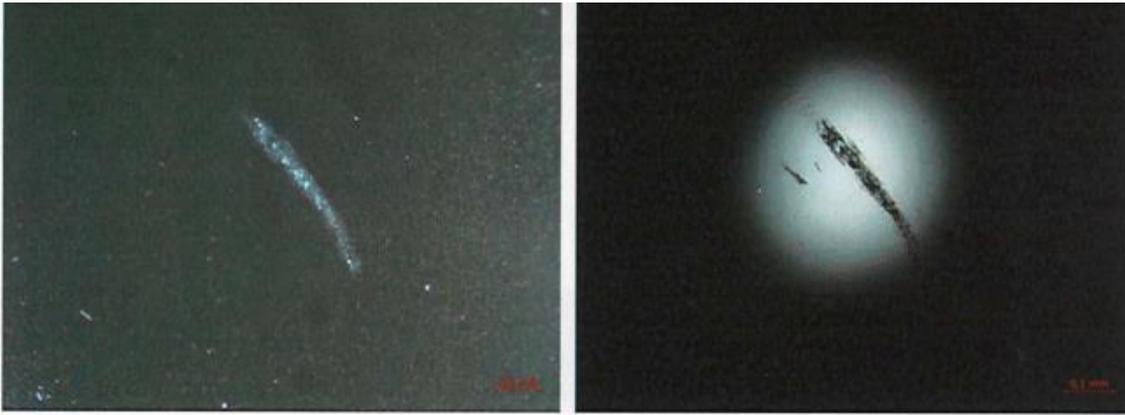


Figure 2. Grandes marques de contact

Des «Cuts» ont également été détectées sur toutes les surfaces des billes avec une mesure moyenne de 150 μm et une mesure de coupe maximale de 260 μm . Dans cet article, l'effet de ces imperfections de surface sur le comportement vibratoire des roulements est étudié.

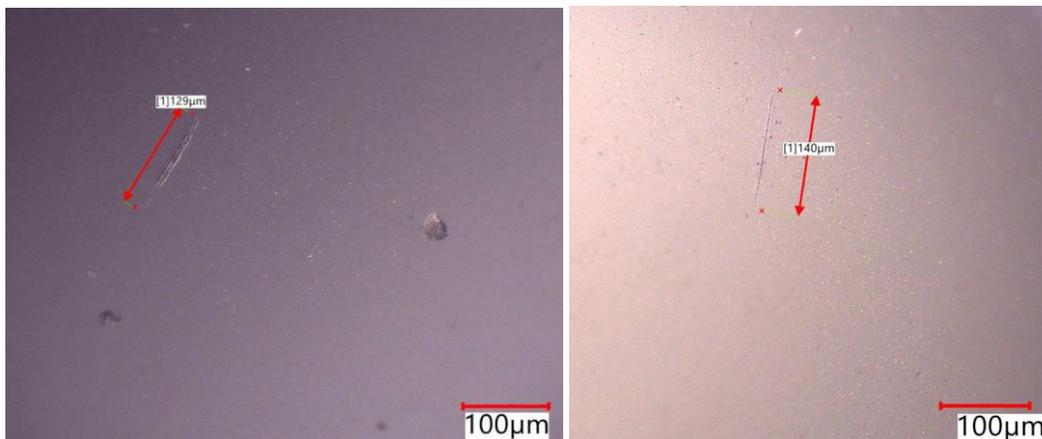


Figure 3. Billes récupérées dans une boîte à billes neuve présentant des 'Cuts'

La macrostructure de toutes les billes est uniforme et fine. Des variations localisées de couleur sous forme de taches sombres ont été observées.

Les évaluations de la microstructure ne montrent aucune porosité, les phases métalliques de siliciure de fer sont réparties de manière homogène dans la matrice uniforme de nitrure de silicium. Les phases céramiques secondaires sont trop fines.

3.2 Mesure vibratoire en tenant compte des normes ISO

Deux roulements ont été assemblés avec des billes en céramique précédentes et testés selon la norme ISO de mesure des vibrations. Avec bague intérieure tournant à 30 Hz et bague extérieure fixe, avec une charge axiale répartie de 200 N. La mesure de la vitesse de vibration a été enregistrée toutes les 30 minutes. Le premier roulement a été démonté après quelques secondes, une inspection visuelle a été effectuée, puis le roulement a été remonté et utilisé comme roulement (A) pour le test à grande vitesse, et le deuxième roulement a été démonté après 6 heures.

La plage de fréquences par défaut analysée selon les normes ISO est de 50-10000 Hz, divisée en 3 bandes de fréquences : Basses fréquences 50-300 Hz, moyennes fréquences 300-1800 Hz et hautes fréquences 1800-10000 Hz.

3.3 Procédure d'essais à grande vitesse

Quatre roulements hybrides appelés roulements A, B, C et D ont été assemblés avec les billes en céramique analysées précédemment présentant de nombreux défauts précoces et particulièrement beaucoup de « Cuts » sur la surface avec une taille de comprise entre 34 et 90 μm comme le montre la figure 5. D'autre part, quatre roulements hybrides de la même référence ont été montés avec des billes

céramiques sans ce type de défauts appelées roulements 1, 2, 3 et 4. Avant assemblage, toutes les bagues ont été testées et des mesures dimensionnelles ont été effectuées, toutes les bagues sont conformes au cahier des charges.

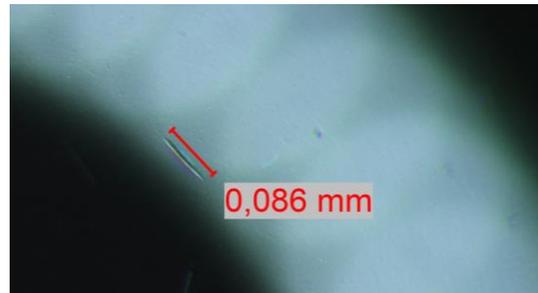


Figure 4. Taille d'un défaut 'Cut' sur bille céramique

Quatre tests ont été effectués, avec deux cas de charge radiale 500 et 1000 N et un cycle de vitesse entre 2000 et 17000 RPM. Les conditions d'entrée sont décrites dans le tableau 1.

Sur le banc d'essai, les roulements ont été montés par paires, les roulements A-1 et C-3 avec le cas de charge 1 ; et roulements B-2 et D-4 avec cas de charge 2. Des accéléromètres ont été positionnés sur les directions radiales des logements de roulement gauche et droit.

Test parameters according to test specification	Value (unit)
Axial load	500 N
Radial load	500 N - Case #1 1000 N – Case #2
Temperature	70°C on OR
Lubrication	Oil bath (Mobil DTE 22)
Alarm T°	160°C
Misalignment	0'
Running-in	2000 rpm (1h)
Speed	See test program
Duration test	11,3 hours

Table1. Paramètres de test à grande vitesse

4 Résultats

4.1 Mesure vibratoire selon les normes ISO : résultats et discussion

En conditions de mesure standards, un petit bruit inhabituel a été remarqué. Aussi, le spectre d'enveloppe a montré des défauts de bague intérieure et billes, figure 5.

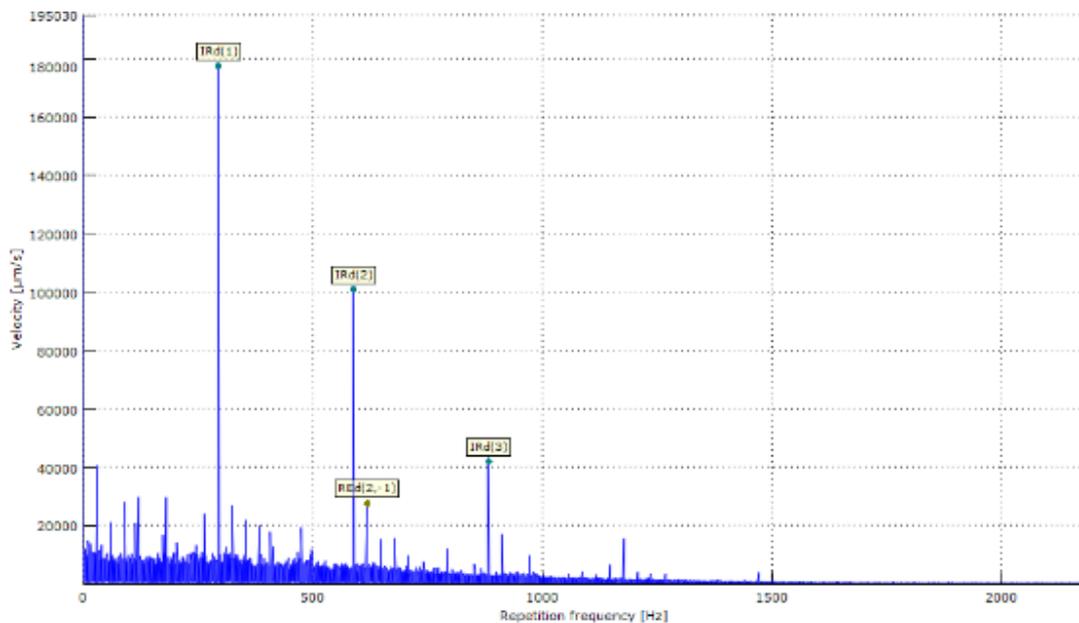


Figure 5. Spectre enveloppe du premier roulement

Une inspection visuelle après 30 secondes de fonctionnement a montré la présence de coupures très superficielles sur la bague intérieure (figure 6), et des « Cuts » sur plusieurs billes, comme celles détectées avant l'assemblage du roulement.

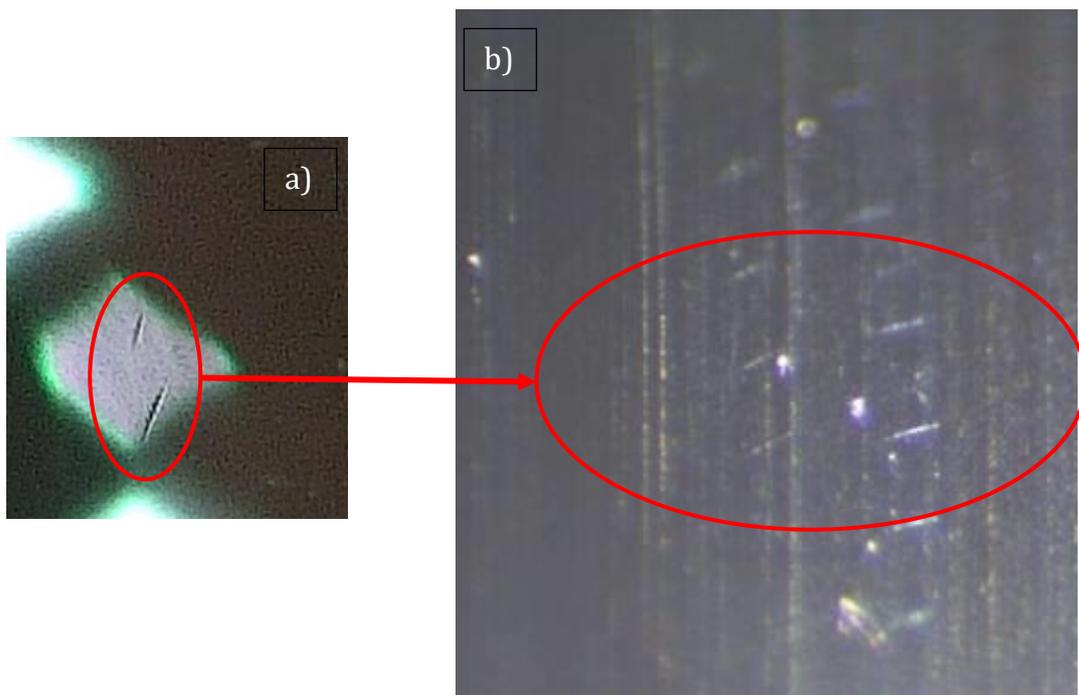


Figure 6. a) surface de billes, b) surface du chemin de bague intérieure

Un deuxième roulement a été testé dans les mêmes conditions pendant 6 heures. Il a été remarqué que les niveaux RMS des bandes Medium et High ont augmenté progressivement, avec les fréquences de défauts de bague intérieure et de billes clairement présentes. Après le démontage, une inspection visuelle a été effectuée sur les bagues et les billes. Aucune évolution de fissure n'a été constatée sur les billes. Cependant les « Cuts » sur la bague intérieure étaient présentes. La taille des défauts le chemin des bagues correspond à la taille des « Cuts » sur les billes. De plus, des indentations ont été remarquées sur le chemin de bague intérieure, probablement dues à des particules de meule.

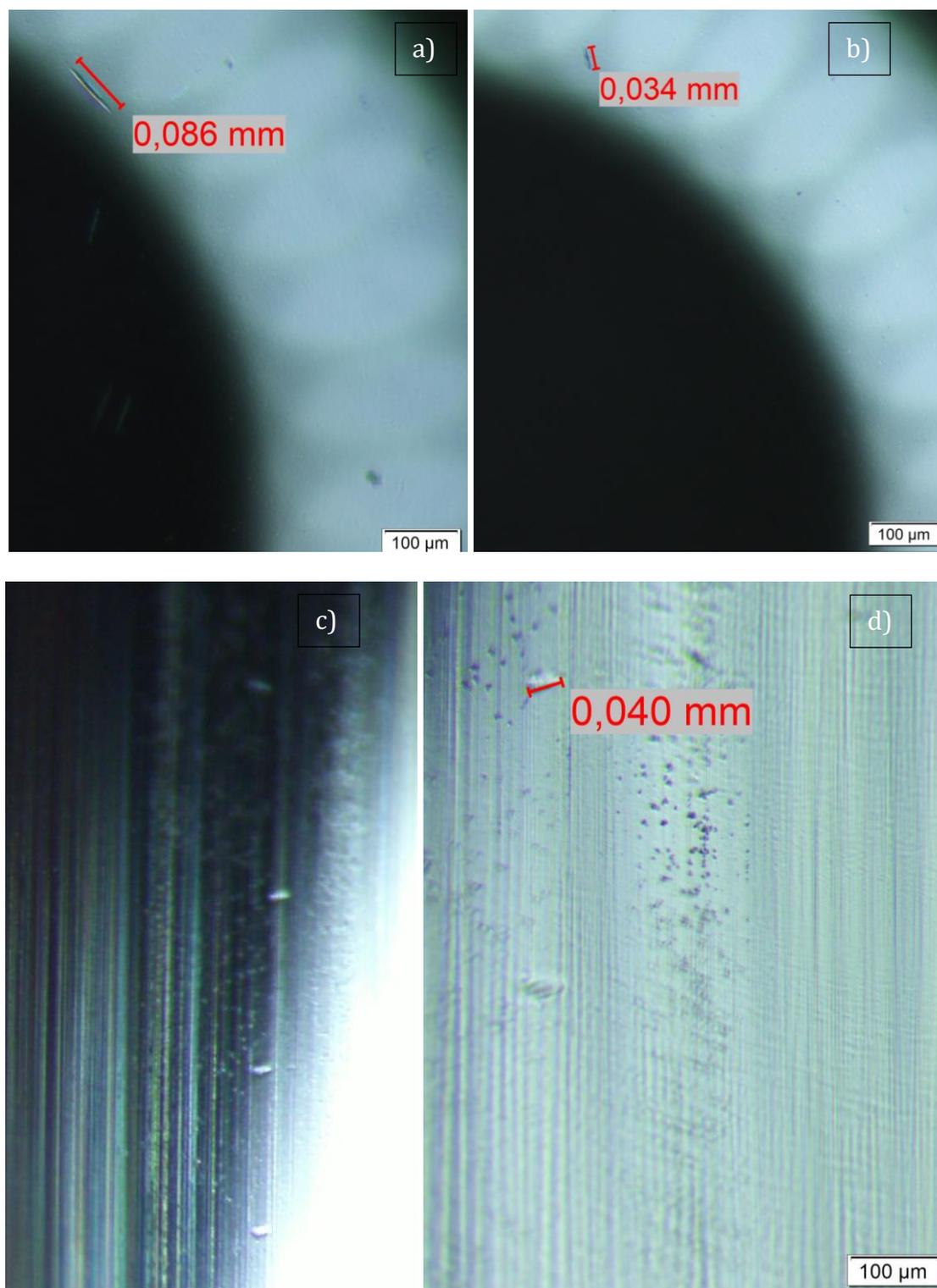


Figure 6. a), b) cuts sur les billes, c), d) marques de cuts sur la bague intérieure

4.2 Essais à grande vitesse : résultats et discussion

4.2.1 Évolution de la température sur chaque roulement

Les essais avec le cas de charge 2 ont été arrêtés en raison d'une température élevée sur les roulements B et D.

Il a été remarqué pour tous les tests que la température des roulements avec des « Cuts » sur les billes est bien supérieure à la température des roulements sans imperfection, en particulier pour le cas de

charge 2 avec une charge radiale plus élevée où la température a dépassé la limite d'alarme. Comme le montrent les graphiques suivants.

4.2.2 Analyse vibratoire sur banc d'essai

Au cours des tests, l'accélération des vibrations a été enregistrée, les niveaux globaux du spectre d'accélération sont plus élevés pour les roulements A, B, C et D par rapport aux roulements 1, 2, 3 et 4. De plus, il a été observé que les niveaux sont plus élevés avec le cas de charge 2 par rapport au cas de charge 1, et particulièrement à grande vitesse (entre 13 000 et 17 000 tr/min)

L'analyse spectrale des roulements A, B, C et D à grande vitesse montre les harmoniques de défauts de bagues intérieure et extérieure, figure 8.

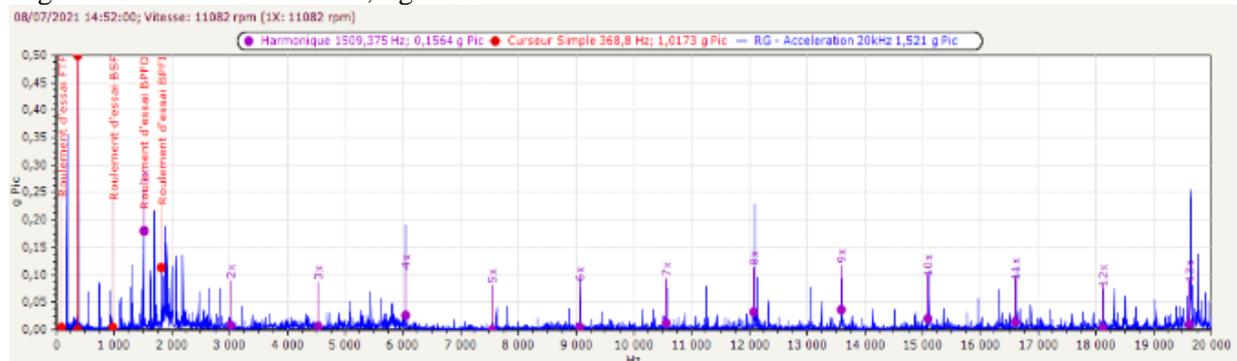


Figure 7. Spectre du roulement D avec harmoniques BPFO à 11082 RPM

4.2.3 Contrôle visuel des roulements après démontage

L'inspection visuelle, plus spécifiquement sur les roulements A, B, C et D, a pour but de voir l'évolution des imperfections étudiées sur les billes céramiques et leur impact sur les bagues après environ 11 heures de test. Précisément l'imperfection qui était déjà très présente sur le roulement A de façon superficielle.

Pour tous les roulements, aucune évolution des « Cuts » sur les billes céramiques n'a été observée, seules quelques indentations dues aux particules dures ont été remarquées sur les billes. Pour les roulements A, B, C et D les billes ont des « Cuts » entre 40 et 113 μm comme celles observées avant assemblage des roulements. Cependant, les bagues intérieure et extérieure présentent de nombreuses indentations dues aux particules (présentes dans le bain d'huile) et avec les « Cuts » similaires à celles sur les billes (avec la même gamme de tailles) comme le montre la figure 9.

De plus, il a été observé que les bagues intérieure et extérieure des roulements A, B, C et D sont jaunâtres en raison de la température.

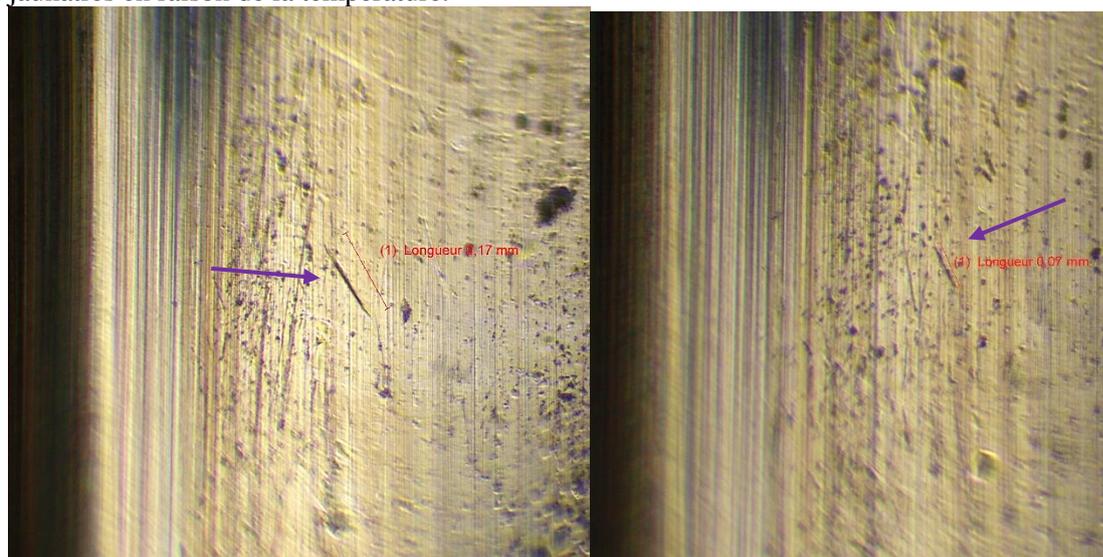


Figure 8. Défauts de la bague intérieure

5 Conclusions

De tous les résultats des tests, dans des conditions de vitesse et de charge variables. Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Les « Cuts » sur les billes dans la plage comprise entre 10 et 140 μm n'évoluent pas dans des conditions de vitesse élevée et de charge modérée.
- Cependant, il a été observé que ces défauts sur les billes céramiques génèrent un défaut de bague intérieure et extérieure qui affecte le niveau de vibration du roulement, en particulier à des vitesses élevées et des cas de charge élevés.
-

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier les équipes SKF Testing et GBI.

Références

- [1] B. Alfredsson. A study on contact fatigue mechanisms. Thèse de doctorat. Stockholm (Suède): Department of Solid Mechanics, Royal Institute of Technology, 2000
- [2] S. Freiman et J.J. Mecholsky. The Fracture of Brittle Materials. 2011, ed.J. Wiley & Sons, 300 p.
- [3] G.C.Rauch,W.C. Leslie, 'The extent and nature of the strength-differential effects in steels', Metal. Trans. 3 (1972) 377-389
- [4] Mian Hammad Nazir, Zulfiqar Ahmad Khan, Adil Saeed, 'Experimental analysis and modelling of c-crack propagation in silicon nitride ball bearing element under rolling contact fatigue', Tribology International, Volume 126, 2018, Pages 386-401,
- [5] Hadfield M. 'Failure of Silicon Nitride rolling elements with ring cracks defects. Ceram Int 1998;24:379_86
- [6] Junbiao Lai, Yuri Kadin, Charlotte Vieillard, 'Characterization and modelling of the degradation of silicon nitride balls with surface missing-material defects under lubricated rolling contact conditions', Wear, Volumes 398–399, 2018, Pages 146-157, ISSN 0043-1648,
- [7] Piet Lugt, Marco T. van Zoelen, Charlotte Vieillard, Frank Berens, Robert Gruell, Gerwin Preisinger, Paul Meaney, 'Grease Performance in Ball and Roller Bearings for All-Steel and Hybrid Bearings' March 2021, Tribology Transactions
- [8] Ying Wang, Hadfield M. , 'Rolling Contact Fatigue of Ceramics', annuary 2004, Wear 256(1):208-219
- [9] Vieillard, C. Observation of subsurface rolling contact fatigue cracks in silicon nitride and comparison of their location to Hertzian contact subsurface stresses. Int. J. Fatigue 2017, 96, 283–292.
- [10] Khan ZA, Hadfield M. 'Manufacturing induced residual stress influence on the rolling contact fatigue life performance of lubricated silicon nitride bearing materials'
- [11] G. Hamburg, P. Cowley, and R. Valori, 'Operation of an All-Ceramic Main Shaft Roller Bearing in J-402 Gas-Turbine Engine', Lubr. Eng. (J. ASME) Vol 37, 1981, p 407–415
- [12] D. Scott and J. Blackwell, 'Hot Pressed Silicon Nitride as a Rolling Bearing Material— A Preliminary Assessment, Wear, Vol 24, 1973, p 61–67
- [13] G.R. Miller, L.M. Keer, and H.S. Cheng, 'On the Mechanics of Fatigue Crack-Growth due to Contact Loading', Proc. R. Soc. (London) A: Math. Phys. Sci., Vol 397, 1985, p 197– 209
- [14] R. Parker and E.V. Zaretsky, 'Fatigue Life of High-Speed Ball Bearings with Silicon Nitride Balls', J. Lubr. Technol., (Trans. ASME), 1975, p 350–357
- [15] F.R. Morrison, J.I. McCool, and T.M. Yonushonis, 'The Load-Life Relationship for M50 Steel Bearings with Silicon Nitride Ceramic Balls', Lubr. Eng. J. ASME, Vol 40, 1984, p 153–159
- [16] N.B. Thomsen and B.L. Karihaloo, 'Subsurface and Surface Cracks under Contact Loading in Transformation-Toughened Ceramics', J. Mech. Phys. Solids, Vol 44, 1996, p 207–231

- [17] Brizmer, V., Gabelli, A., Vieillard, C., and Morales-Espejel, G. E., "An experimental and theoretical study of hybrid bearing micro pitting performance under reduced lubrication," Tribology Transactions, vol. 58, no. 5, pp. 829–835, 2015
- [18] S.S. Kim, K. Kato, K. Hokkirigawa, and H. Abe, 'Wear Mechanism of Ceramic Materials in Dry Rolling Friction', Trans. ASME, Vol 108, 1986, p 522–526
- [19] A. Palmgreen, Les roulements descriptions, théorie, applications, Paris : SKF (1967) 120p.
- [20] T. C. Lim, Vibration transmission through rolling element bearing, Part I to IV. Journal of Sound and Vibration 139-2 (1990), 179-199.
- [21] K. Larsen & Son, Essais structurels : 2^{ème} partie : Analyse modale et simulation, Document pédagogique Brüel & Kjaer©, 53 p, (1989).
- [22] Hou, P.P ; Wang, L.Q. ; Peng, Q.Y., 'Vibration analysis of ball bearing considering waviness under high speed and an axial load', Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, 2020, Volume 68, No. 3
- [23] J. A. Wensing, 'On the dynamics of ball bearings. December 1998'.
- [24] D.Perrin. Note de calcul Vibration axiale de roulement. Vibration axiale de roulement.doc. Mai 2008
- [25] <https://cdn.standards.itih.ai/samples/43618/175dc2d8525344c384d9511ec0bcbae7/ISO-26602-2009.pdf>