

TECHNICAL INSIGHT

UNE PUBLICATION DE NSK EUROPE

Acier NSK TF Tough Steel™ pour conditions de fonctionnement sévères

Le concept NSK de longue durée de vie dans des environnements contaminés fait exception dans le secteur industriel des roulements. Le service de recherche de NSK fut le premier à établir la relation entre l'austénite résiduelle et l'endurance du roulement dans les environnements contaminés.

Contrôle des défaillances des roulements dans les environnements contaminés

Les roulements en service dans des environnements propres utilisent de la graisse très propre ou une lubrification à l'huile hautement filtrée et, s'ils sont correctement installés, leur défaillance éventuelle est causée par un phénomène de fatigue en subsurface. La défaillance des roulements exposés à un environnement contaminé est causée par un phénomène de fatigue en surface. L'acier propre a fait preuve de son efficacité à prolonger la durée de vie des roulements en service dans des environnements propres, tandis que les roulements « Sealed-Clean » permettent d'allonger la durée de vie des roulements dans des conditions contaminées.

La présence de débris dans les roulements est prédominante dans les secteurs des mines, des granulats, de la métallurgie et du ciment. Ces débris sont à l'origine d'un phénomène de fatigue en surface qui affecte la durée de vie des roulements. Les roulements « Sealed Clean » utilisent un joint de contact pour empêcher les débris nuisibles de pénétrer dans le roulement. Malheureusement les roulements étanches ne peuvent pas être utilisés dans toutes les applications, et les joints d'étanchéité ne permettent pas toujours de bloquer tous les débris. Dans de tels cas, la solution est offerte par les roulements en acier Tough Steel™.

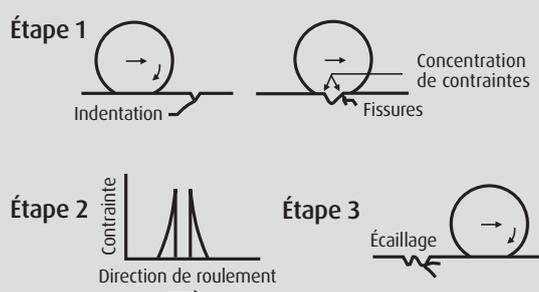


Le phénomène d'écaillage en surface

Différents types de débris peuvent produire des indentations sur les chemins de roulement en rotation. La pression de contact est extrêmement élevée sur les bords des indentations et des dommages par fatigue se produisent à un rythme accéléré (fig. 1).



Figure 1 : Origine de l'écaillage en surface



Le phénomène d'écaillage en surface

L'équation suivante décrit la concentration de contraintes au niveau de l'épaulement d'une indentation². Le rapport entre la contrainte de cisaillement maximale t_c au niveau de l'indentation et la pression de contact nominale (p_o) en l'absence d'indentations est décrit par la formule ci-après :

$$t_c / p_o = a_1 (Co) a^2$$

$$\text{Où, } a_1 = 0,22 \quad \text{et } a^2 = -0,24$$

Co est appelé le facteur de gravité de rayure et il est obtenu par la formule suivante :

$$Co = (\pi^2 p_o / E^0) (r/c)$$

r = rayon de l'épaulement de la rayure, en mm

c = moitié de la largeur de la rayure, en mm

p_o = pression de contact nominale, en N/mm²

E^0 = module de Young réduit, en N/mm²

Dans la formule ci-dessus, la forme de l'indentation, représentée par les valeurs r et c (**fig. 2**), a une forte influence sur l'endurance du roulement. Une valeur r/c élevée favorise une durée de vie plus longue, du fait de la concentration de contraintes réduite sur le bord de l'indentation.

Figure 2 : Vue agrandie d'une indentation causée par la contamination

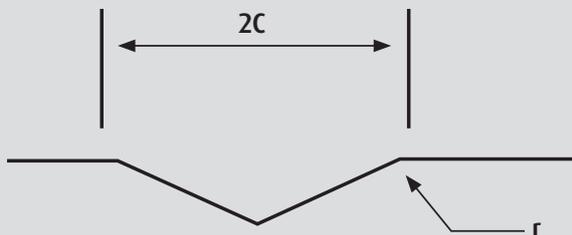
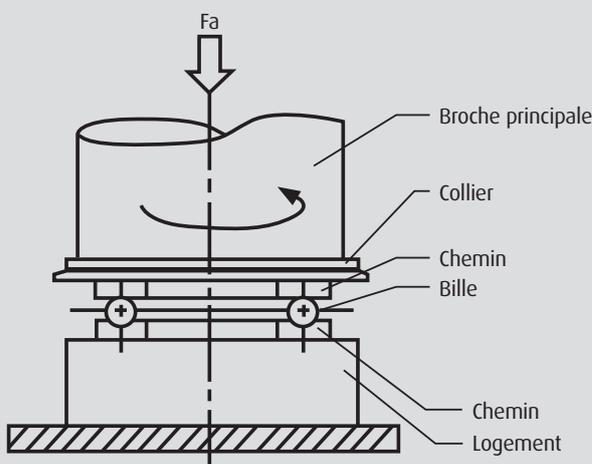


Figure 3 : Vue en coupe longitudinale d'une broche de machine d'essai de butées



Contour de l'indentation et facteur relatif au matériau

Les expériences suivantes ont été effectuées afin d'éclaircir la relation entre le contour de l'indentation (rapport r/c) et le pourcentage d'austénite résiduelle. Elles ont été effectuées sur une machine d'essai de butées utilisée pour l'évaluation de la résistance à la fatigue par contact de roulement. La **fig. 3** montre la broche de la machine d'essai de butées avec l'échantillon d'essai.

Procédure de test

1. Des échantillons d'essai en forme de rondelle, avec un large éventail de valeurs de dureté et d'austénite résiduelle, ont été préparés dans un assortiment de matériaux et de procédés de traitement thermique divers.
2. Une indentation Vickers a été réalisée sur chaque chemin de roulement à tester.
3. Les valeurs r et c créées par l'indentation ont été mesurées.
4. Chacun de ces chemins de roulement a été placé dans la machine d'essai et submergé d'un bain d'huile propre. Une contrainte a été appliquée en faisant rouler des billes en acier sur l'indentation sous une charge spécifiée.
5. Le contour de l'indentation a été tracé après avoir retiré l'échantillon de la machine d'essai.

L'analyse de la valeur r/c par rapport aux cycles de l'essai a montré une stabilisation de la valeur r/c après 3 000 cycles. Les résultats de l'essai ont montré qu'après une minute d'essai (3 000 cycles), la valeur r/c augmente conjointement avec le pourcentage en volume d'austénite résiduelle. La limite supérieure d'austénite résiduelle est régie par la stabilité dimensionnelle, comme cela est décrit plus loin dans la présente publication.

L'essai a été réalisé avec trois séries d'échantillons différentes. La série UN était composée d'échantillons contenant 32 % d'austénite résiduelle et ayant une dureté de Hv802. La série DEUX était composée d'échantillons contenant 33 % d'austénite résiduelle et ayant une dureté de Hv716. La série TROIS était composée d'échantillons contenant 10 % d'austénite résiduelle et ayant une dureté de Hv739. La comparaison de la série UN avec les séries DEUX et TROIS a permis de révéler que la contrainte répétée a produit une valeur r/c supérieure avec les matériaux durs qu'avec les matériaux plus mous.

Il a également été remarqué que la relaxation des contraintes pour le matériau le plus mou avec la teneur en austénite la plus faible a pratiquement été atteinte dans un temps relativement court de quelques milliers de cycles. La relaxation des contraintes pour le matériau le plus dur avec la teneur en austénite la plus élevée a persisté en raison de l'augmentation continue de la valeur r/c .

De nouvelles exigences de matériaux

Étant donné la nature molle de l'austénite résiduelle, il est difficile de produire une pièce ayant à la fois une dureté élevée et un volume important d'austénite résiduelle. D'où la nécessité de nouvelles spécifications d'acier. Des procédés de traitement thermique innovants ont été créés pour répondre aux nouvelles spécifications d'acier. Ceci a été réalisé en élevant la teneur en chrome de l'acier, entraînant ainsi une augmentation des carbures et des carbonitrides fins répartis dans la matrice du matériau.

Les procédés de traitement thermique classiques ne permettent pas d'atteindre les propriétés de matériau requises. Par procédé classique, on entend la cémentation ou la trempe, les résultats en termes de durée de vie étant similaires dans un environnement contaminé. Des nouveaux procédés de traitement thermique ont été développés pour affiner les carbures ou les carbonitrides après cémentation ou carbonituration.

Les spécifications du nouvel acier Tough Steel™ ont été formulées d'après les résultats de cette étude. Ces spécifications sont caractérisées par le contenu en éléments suivant :

C	Si	Mn	Cr
0,42%	0,39%	1,24%	1,23%

Essai de l'endurance

Un autre essai de butée a été effectué dans des conditions de lubrification contaminée. Les résultats montrent qu'une augmentation contrôlée du volume d'austénite résiduelle se traduit par une durée de vie prolongée. En outre, lorsque le volume d'austénite résiduelle est maintenu mais que la dureté est augmentée, il est possible d'atteindre une durée de vie encore plus longue.

Pour déterminer à nouveau les paramètres de matériau requis, des roulements ont été fabriqués dans ces matériaux et testés dans des conditions de lubrification contaminée.

Le **fig. 4** montre le banc d'essai utilisé pour cette évaluation. Les roulements utilisés dans cet essai ont fonctionné dans de l'huile de transmission contaminée. Les contaminants ont été bien mélangés avec l'huile qui est passée au travers des roulements d'essai. La température de l'huile a été contrôlée pour maintenir la viscosité. Les roulements en acier Tough Steel™ ont fonctionné correctement pendant une durée comprise entre 7 et 11 fois la durée de vie des butées à rouleaux classiques en acier cémenté ou en acier trempé.

Les résultats des essais de durée de vie des roulements à billes à gorges profondes montrent que les roulements en acier Tough Steel™ ont une durée de vie 6 fois plus longue que les roulements à billes classiques.

Progression de la fatigue

Afin d'analyser la durée de vie prolongée des roulements en acier Tough Steel™, les essais suivants ont été effectués au moyen du boîtier intermédiaire de la machine d'essai. Au cours de ces essais de durée de vie, la progression de la fatigue sur la surface des chemins de roulement a été mesurée après une certaine durée, à l'aide d'une méthode appelée « Analyse de la fatigue ». Il s'agit d'une méthode originale développée par NSK.

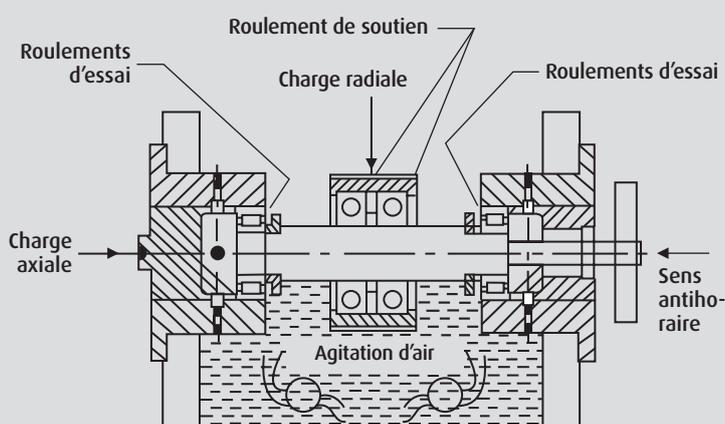
En utilisant la technologie de diffraction des rayons X, NSK a déterminé, de manière semi-quantitative, la progression de la fatigue dans le matériau. Au cours de la progression de la fatigue, un changement intervient dans le réseau cristallin de martensite et l'austénite résiduelle se transforme en martensite. En mesurant les deux facteurs par rayons X, il est possible de déterminer le type de fatigue (initiée en surface ou en subsurface) et l'étape de progression de la fatigue. L'Analyse de la fatigue permet d'effectuer un contrôle destructif ou non destructif.

Un contrôle non destructif a été effectué après une durée de test déterminée pour chaque test. Pour ce contrôle, les rayons X ont été dirigés sur la surface de contact de roulement uniquement et les changements dans la structure des matériaux ont été évalués.

Après l'essai de durée de vie, un contrôle destructif a été effectué en utilisant l'analyse par rayons X. Cela nécessite d'enlever de très fines couches de matériau du roulement au niveau de la zone d'indentation et d'enregistrer les changements structuraux du matériau à l'intérieur du roulement. Cet examen a révélé que dans les mêmes conditions de charge et d'environnement, les roulements en acier Tough Steel™ affichent une progression plus lente de la fatigue que les roulements classiques.

L'essai a commencé avec une indentation modèle et a été poursuivi jusqu'à l'apparition d'écaillage sur le chemin de roulement. L'indentation modèle a été réalisée en appliquant un diamant Vickers sur la surface. Puis le contour de l'indentation a été mesuré.

Figure 4 : Banc d'essai de butées dans des conditions de lubrifiant contaminé



Ensuite, le roulement a été mis en charge et le test de durée de vie a été effectué avec une lubrification propre. Après une durée déterminée, les roulements ont été retirés du boîtier intermédiaire de la machine d'essai. La surface a été observée à l'aide d'un microscope et le contour de l'indentation a été mesuré. Ce processus a été répété jusqu'à apparition de l'écaillage.

NSK a ensuite noté le moment d'apparition de la fissure et la zone d'écaillage pour le roulement en acier Tough Steel™ et pour le roulement classique. La fissure sur le roulement en acier Tough Steel™ est apparue plus tard et la progression de l'écaillage a été ralentie.

Les résultats des essais ont révélé que les roulements en acier Tough Steel™ ont un rayon d'épaulement plus grand au niveau des indentations que les roulements classiques. Les résultats ont montré que les roulements en acier Tough Steel™ ont une durée de vie prolongée dans des conditions contaminées, en raison de la concentration de contraintes réduite au niveau de l'épaulement de l'indentation. Cette différence de forme du rayon est la raison pour laquelle les roulements en acier Tough Steel™ ont une durée de vie plus longue dans les environnements contaminés.

Résistance à l'usure et limite de grippage

Les roulements en acier Tough Steel™ contiennent un grand nombre de carbures et de carbonitrides fins qui leur procurent une résistance supérieure à l'usure et au grippage. Les taux d'usure et de limite de grippage ont été déterminés à l'aide d'une machine d'essai de type Sawin, qui est spécifiquement utilisée pour évaluer la résistance à l'usure.

Les résultats montrent que les roulements en acier Tough Steel™ s'usent moins vite et ont une limite de grippage plus élevée que les roulements classiques en acier cimenté ou en acier trempé. Même si la charge appliquée semble faible, la pression de contact maximale atteint 98 N/mm². La machine d'essai de type Sawin a été utilisée car elle permet aussi de simuler une condition « sans lubrification ». Ceci est utile pour identifier le point de changement entre usure moyenne et usure importante, qui détermine la limite de grippage.

Stabilité dimensionnelle

Une autre caractéristique importante d'un matériau de roulement est la stabilité dimensionnelle. Plusieurs roulements à rouleaux coniques, en acier Tough Steel™, en acier trempé et en acier cimenté respectivement, ont été testés. Le modèle de roulement utilisé pour cet essai est un roulement L44610 de diamètre extérieur 50,292 mm.

Des échantillons de cinq types de matériau ont été maintenus dans un four à 130 °C pendant 4 000 heures, puis les diamètres extérieurs des roulements ont été mesurés. Une autre série d'échantillons de cinq types de matériaux ont été maintenus dans un four à 170 °C pendant 1 000 heures. Les diamètres extérieurs des roulements ont ensuite été mesurés. La stabilité

dimensionnelle des roulements en acier Tough Steel™ se situe entre celle des roulements en acier trempé et celle des roulements en acier cimenté.

Les résultats des roulements en acier cimenté et carbonitrurés ont également été représentés en comparaison avec le roulement en acier Tough Steel™. Le roulement en acier cimenté affiche des résultats similaires au roulement en acier Tough Steel™, mais le roulement carbonitruré affiche une expansion importante de la bague extérieure pour les deux gammes de température.

Conclusion :

1. Pour ce qui concerne les roulements utilisés dans des applications où la lubrification est contaminée, telles que les secteurs des mines, des granulats, du ciment et de la sidérurgie, un matériau contenant un volume important d'austénite résiduelle et ayant une dureté élevée procure une durée de vie prolongée.
2. Pour atteindre de telles propriétés, de nouvelles spécifications d'acier et des procédés de traitement thermique méticuleusement contrôlés ont été développés et mis en œuvre pour produire l'acier Tough Steel™.
3. Les roulements en acier Tough Steel™ ont une durée de vie plus de 6 fois plus longue que les roulements classiques dans des conditions de contamination et de charges similaires.
4. Les roulements en acier Tough Steel™ ont une progression plus lente de la fatigue. L'apparition des fissures est retardée, et leur propagation est plus lente au niveau de l'épaulement de l'indentation.
5. Les roulements en acier Tough Steel™ ont une durée de vie plus de 8 fois plus longue que les roulements classiques lorsqu'ils sont comparés au cours d'un essai de durée de vie.
6. Les roulements en acier Tough Steel™ offrent des avantages en termes de résistance à l'usure et de limite de grippage.
7. Leur stabilité dimensionnelle se situe entre celle de l'acier trempé et de l'acier cimenté.

-
1. Murakami, Y. and Matsumoto, Y. "Study of Long Life Bearing Materials" Preprints of JAST Tribology Conference, Okayama, (1988) 297 - 300. [in Japanese]
 2. Chiu, Y.P. and Liu, J.Y. "An Analytical Study of the Stress Concentration Around a Furrow Shaped Surface Perfect in Rolling Contact," Trans. ASME, JOLT, (1970) 258-263.
 3. Tanaka, E., Furumura, K, and Ohkuma, T. "Highly Extended Life of Transmission Bearings of Sealed-Clean Concept," SAE Paper 830570 (1983).
 4. Yasuo Murakami and Takaaki Shiratani "Fighting Debris: Increasing Life with HTF Bearings for Transmissions," SAE Paper No. 940728 (1984)
-

Pour plus d'informations, visitez www.nskeurope.com.