

TECHNICAL INSIGHT

EINE VERÖFFENTLICHUNG VON NSK EUROPE

TF Tough Steel™ von NSK für harte Betriebsbedingungen

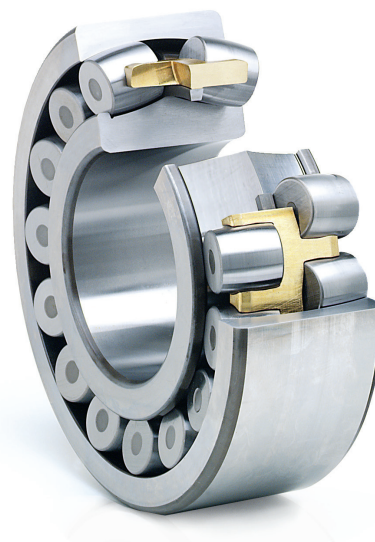
Das NSK-Konzept für Langlebigkeit in verschmutzten Umgebungen ist in der Lagerindustrie einzigartig. Durch seine Forschungsarbeiten hat NSK als erstes Unternehmen den Zusammenhang zwischen Restaustenit und Wälzermüdung erkannt.

Beschreibung des Lagerausfalls in verschmutzten Umgebungen

Untersuchungen haben gezeigt, dass Wälzlager, die in reinen Umgebungen mit ausreichendem Schmierstoff betrieben werden (sauberes Fett, gefiltertes Öl) durch Materialermüdung ausfallen. Die Materialermüdung tritt unter der Oberfläche auf. Hierbei gilt – je reiner der Stahl, desto höher ist die erreichende Lebensdauer. Es wird vorausgesetzt, dass die Montage fehlerfrei durchgeführt wurde.

Bei verschmutzten Umgebungsbedingungen erreichen abgedichtete Lager somit eine erhöhte Lebensdauer.

Verunreinigungen wie Fremdkörper gelten als häufige Ausfallursache in der Bergbau-, Gesteins-, Stahl- und Zementindustrie. Die Überrollung der Fremdkörper führt zu einer Materialermüdung der Oberfläche und verkürzt die Lebensdauer der Lager. Unsere „Sealed Clean“ Lager sind mit einer Hochleistungsdichtung ausgestattet, die verhindert, dass Fremdkörper in das Lager eintreten können. Nicht in allen Bereichen können abgedichtete Lager eingesetzt werden. Zudem kommt es vor, dass die Dichtungen nicht immer alle Fremdkörper abhalten können. In diesen Fällen empfiehlt sich der Einsatz von „Tough-Steel™“-Lagern.

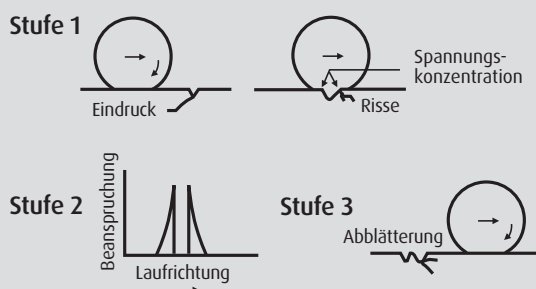


So entstehen Ablätterungen an den Oberflächen

Verschiedene Arten von Überrollungen können Eindrücke in den Laufbahnen verursachen. Die Kontaktspannung ist an den Aufwerfungen extrem hoch, sodass es dort sehr häufig zu Ermüdungsschäden kommt (Abb. 1).



Abb. 1: Entstehung von Ablätterungen an der Oberfläche



So entstehen Ablätterungen an den Oberflächen

Die nachfolgende Gleichung beschreibt die Spannungskonzentration an der Schulter eines Eindrucks. Das Verhältnis der maximalen Scherbeanspruchung t_c an dem Eindruck zum nominalen Anpressdruck p_o , wenn kein Eindruck vorhanden ist, errechnet sich wie folgt:

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

Wobei $a_1 = 0.22$ und $a^2 = -0.24$

C_o steht für den Schweregrad eines Eindrucks, der durch die nachfolgende Gleichung ermittelt wird:

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

r = Radius der Aufwerfung in mm

c = halbe Eindruckbreite in mm

p_o = nominaler Anpressdruck in N/mm^2

E^0 = reduzierter Elastizitätsmodul (Young'scher Modul) in N/mm^2

In der oben angeführten Gleichung übt die Form des Eindrucks, anhand von r und c dargestellt (Abb. 2), einen starken Einfluss auf die Lagerlebensdauer aus. Ein höherer r/c -Wert fördert die Lebensdauer des Lagers, da es am Rand der Kerbe zu einer geringeren Spannungskonzentration kommt.

Abb. 2: Vergrößerte Darstellung eines Eindrucks, die durch Verschmutzungen entstanden ist

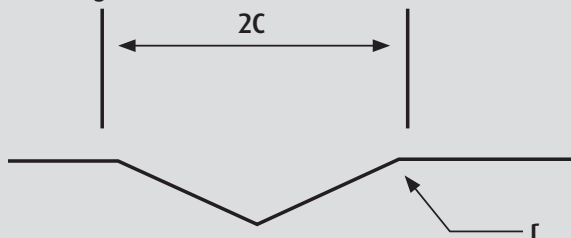
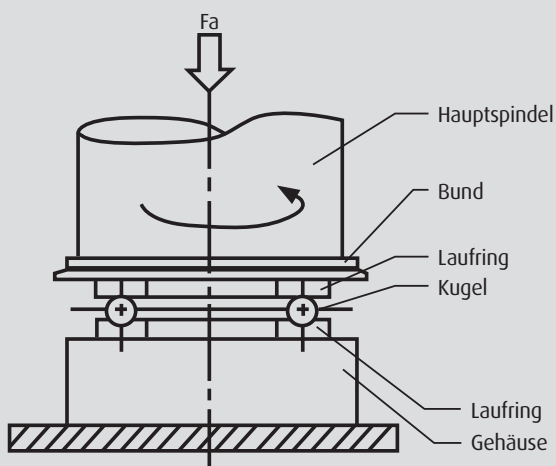


Abb. 3: Querschnitt der Spindel im Prüfgerät für Axiallager



Materialaufwerfung und Materialfaktor

Die nachfolgenden Experimente wurden durchgeführt, um das Verhältnis zwischen der Materialaufwerfung (r/c) und dem prozentualen Anteil des Restaustenits zu ermitteln. Die Tests erfolgten an einem Prüfgerät für Axiallager, das für die Bewertung der Walzermüdungsbeständigkeit verwendet wird. Ein Querschnitt der Spindel im Prüfgerät für Gegenlager mitsamt dem Prüfmusterstück ist in Abb. 3 dargestellt.

Prüfverfahren

1. Aus unterschiedlichen Materialien und in verschiedenen Wärmebehandlungsverfahren wurden scheibenförmige Prüfstücke gefertigt, die stark voneinander abweichende Härtegrade und Restaustenitanteile aufwiesen.
2. An jedem Prüflaufring wurde ein Eindruck für die Härteprüfung nach Vickers angebracht.
3. Die Werte der Kerbe für r und c wurden gemessen.
4. Jeder Prüflaufring wurde in die Prüfmaschine eingesetzt und in ein Bad aus reinem Öl getaucht. Anschließend erfolgte eine Belastung durch Stahlkugeln, die mit einer spezifischen Last über die Kerbe gewalzt wurden.
5. Nach Entfernen des Prüfstücks von der Prüfmaschine wurde der Verlauf des Eindruckes analysiert.

Die Analyse von r/c mit den Zyklen der oben genannten Prüfung zeigte, dass sich r/c nach 3.000 Zyklen stabilisierte. Es stellte sich heraus, dass der Wert r/c nach 1 Minute Prüflauf (3.000 Zyklen) zusammen mit den angestiegenen prozentualen Volumenanteilen des Restaustenits zunimmt. Die Obergrenze des Restaustenits wird von der Maßstabilität geregelt und wird später in diesem Bericht näher erläutert.

Im nächsten Schritt wurde die Prüfung mit drei unterschiedlichen Prüfmustersätzen durchgeführt. Satz EINS bestand aus Musterstücken mit 32 % Restaustenit und einem Härtewert von 802 HV. Satz ZWEI bestand aus Musterstücken, die 33 % Restaustenit enthielten und einen Härtewert von 716 HV aufwiesen. Satz DREI bestand aus Musterstücken mit 10 % Restaustenit und einem Härtewert von 739 HV. Der Vergleich von Satz EINS mit den Sätzen ZWEI und DREI zeigte, dass die wiederholte Belastung in den harten Materialien einen höheren r/c -Wert als in den weicheren Materialien erzeugte.

In den Tests wurde bei den weicheren Materialien mit einem niedrigeren Austenitgehalt die Belastungsrelaxation innerhalb der relativ kurzen Zeit von wenigen Tausend Zyklen nahezu vollständig erreicht. Die härteren Materialien mit höheren Austenitgehalten hingegen hielten der Belastungsrelaxation aufgrund des fortwährend ansteigenden r/c -Werts weiter stand.

Anforderungen an neue Materialien

Da Restaustenit an sich weich ist, ist es schwierig, ein Bauteil herzustellen, das sowohl einen hohen Härtegrad als auch ein starkes Volumen an Restaustenit aufweist. Es waren daher neue Stahlspezifikationen erforderlich. Um den besonderen Anforderungen für Stahl zu begegnen, entwickelte NSK innovative Wärmebehandlungsverfahren. Hierbei wurde der Chromgehalt des Stahls erhöht, was zu einer größeren Anzahl von Feinkarbid- oder Karbonitridteilchen im Werkstoff führte.

Mit herkömmlichen Wärmebehandlungsverfahren lassen sich die erforderlichen Werkstoffeigenschaften nicht erreichen. Als „herkömmliche“ Lager werden hier aufgekohlte oder durchgehärtete Lager beschrieben. Beide Lagerarten weisen in einer verschmutzten Umgebung eine ähnliche Lebensdauer auf. Um die Karbide und Karbonitride nach der Aufkohlung bzw. Karbonitrierung zu verfeinern, wurden neue Wärmebehandlungsprozesse entwickelt.

Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Studie arbeitete NSK neue Tough-Steel™-Spezifikationen mit dem folgenden Elementgehalt aus:

C	Si	Mn	Cr
0.42%	0.39%	1.24%	1.23%

Prüfung der Ermüdungsbeständigkeit

NSK führte weitere Tests mit Axiallagern durch, bei denen mit verunreinigten Schmierstoffen gearbeitet wurde. Die Ergebnisse zeigten, dass ein kontrollierter Anstieg im Volumen des Restaustenits zu einer längeren Lebensdauer führt. NSK fand außerdem heraus, dass eine noch längere Lebensdauer erzielt werden kann, wenn das Volumen des Restaustenits beibehalten und gleichzeitig die Härte erhöht wird.

Um die erforderlichen Werkstoffparameter erneut zu prüfen, fertigte NSK Lager aus den Materialien und testete sie unter Einsatz verunreinigter Schmierstoffe.

Abb. 4 zeigt den für die Bewertung verwendeten Prüfstand. Die Lager in diesem Test liefen in verschmutztem Getriebeöl. Die Fremdkörper wurden sorgfältig mit dem Öl vermengt, sodass die Mischung in das Prüflager eindringen konnte. Um die Viskosität des Öls beizubehalten, wurde seine Temperatur kontrolliert.

Die Tough-Steel™-Kegelrollenlager im Test liefen 7- bis 11-mal länger als herkömmliche oder durchgehärtete Lager.

Die Ergebnisse der Lebensdauerprüfung von Rillenkugellagern zeigten, dass die Tough-Steel™-Lager eine 6-mal höhere Lebensdauer aufweisen als konventionelle Kugellager.

Fortschreitende Ermüdung

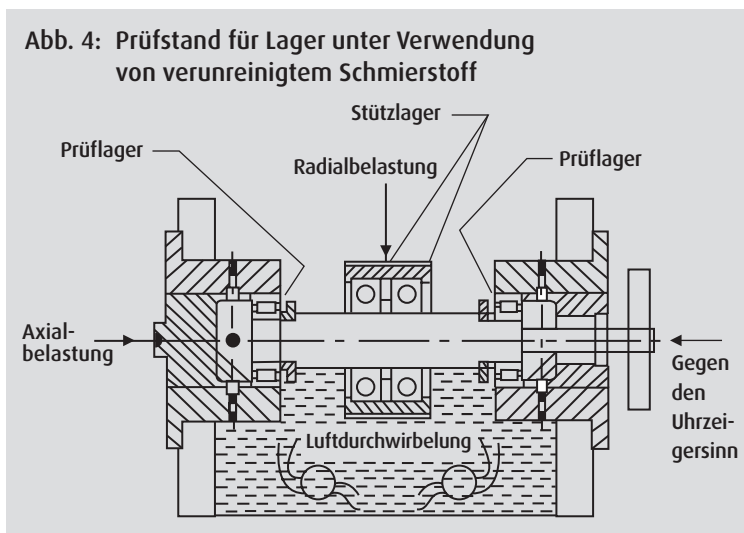
Um die längere Lebensdauer von Tough-Steel™-Lagern detailliert zu untersuchen, wurden unter Verwendung der Medien-Prüfmaschine verschiedene Tests durchgeführt, die im Folgenden erläutert werden. Während dieser Lebensdauerprüfungen wurde das Fortschreiten der Ermüdung der Laufbahnen nach einem bestimmten Intervall gemessen. Hierbei wurde die „Ermüdungsanalyse“ angewendet, eine Methode, die von NSK entwickelt wurde.

Durch Röntgenbeugungstechnik konnte NSK das Fortschreiten der Ermüdung im Werkstoff halbquantitativ ermitteln. Wenn die Materialermüdung voranschreitet, verändert sich das Kristallgitter des Martensits und der Restaustenit wird in Martensit umgewandelt. Durch Messen beider Faktoren mit Röntgenstrahlen lassen sich die Art der Ermüdung (Ursprung in der Oberfläche oder im Lagerinneren) und das Stadium der Ermüdung ermitteln. Die „Ermüdungsanalyse“ kann sowohl als zerstörende als auch als zerstörungsfreie Prüfung durchgeführt werden.

Bei jedem der Tests nahm NSK nach einem bestimmten Intervall eine zerstörungsfreie Prüfung vor. Hierbei wurden Röntgenstrahlen auf der Wälzkontaktfläche angewendet; anschließend wurden die Veränderungen in der Materialstruktur analysiert.

Nach der Lebensdauerprüfung wurde eine zerstörende Prüfung unter Einsatz von Röntgenstrahlen durchgeführt. Dies erfordert das Entfernen von äußerst dünnen Schichten des Lagermaterials im Einkerbungsbereich und die Aufzeichnung der Veränderungen in der Materialstruktur innerhalb des Lagers. Die Untersuchung zeigte, dass Tough-Steel™-Lager unter den gleichen Belastungs- und Umgebungsbedingungen ein langsames Fortschreiten der Ermüdung aufweisen als herkömmliche Lager.

Die Prüfung wurde zunächst mit einem Modelleindruck vorgenommen und so lange fortgesetzt, bis eine Abblätterung an der Lagerlaufbahn auftrat. Hierzu wurde ein Vickers-Stempel in die Oberfläche gedrückt. Anschließend wurde der Umriss des Eindrucks gemessen.



Im nächsten Schritt wurde das Lager belastet und eine Prüfung der Lebensdauer mit sauberem Schmierstoff durchgeführt. Nach einem bestimmten Intervall wurden die Lager aus der Medien-Prüfmaschine entnommen. Die Oberfläche wurde unter einem Mikroskop betrachtet, der Umriss des Eindrucks wurde vermessen. Dieses Verfahren wurde so lange wiederholt, bis es zu einer Abblätterung kam.

NSK ermittelte sowohl für die Tough-Steel™-Lager als auch für die herkömmlichen Lager, ab welchem Zeitpunkt die ersten Risse und Abblätterungen auftraten. Das Ergebnis: Bei den Tough-Steel™-Lagern trat der erste Riss später auf und auch das Fortschreiten bis zur Abblätterung war verlangsamt.

Die Prüfergebnisse zeigten, dass Tough-Steel™-Lager im Gegensatz zu herkömmlichen Lagern einen breiteren Schulterradius an dem Eindruck aufweisen. Die Analysen machten außerdem deutlich, dass Tough-Steel™-Lager unter verschmutzten Bedingungen eine höhere Lebensdauer aufweisen, da bei ihnen die Spannungskonzentration an der Schulter des Eindrucks geringer ist. Der Grund dafür ist der Unterschied in der Radiusform der Materialaufwerfung.

Verschleißfestigkeit und Fresslastgrenze

In Tough-Steel™-Lagern befinden sich sehr viele Feinkarbid- und Karbonitridteilchen, was ihnen eine bessere Verschleißfestigkeit und eine höhere Fresslastgrenze gegenüber herkömmlichen Lagern verleiht. Die Prüfergebnisse der Verschleißrate und der Fresslastgrenze wurden von einer Prüfmaschine des Typs Sawin ermittelt, die speziell zur Beurteilung der Verschleißfestigkeit eingesetzt wird.

Die Analysen ergaben, dass NSKs Lager mit Tough-Steel™-Werkstoff weniger Verschleiß und eine höhere Fresslastgrenze aufzeigen als herkömmliche, durchgehärtete und einsatzgehärtete Werkstoffe. Obwohl die angewendete Belastung niedrig erscheint, beträgt der maximale Flächenanpressdruck 98 N/mm². Die Prüfmaschine vom Typ Sawin wurde eingesetzt, da sie auch schmierstofffreie Bedingungen simulieren kann. Dies hilft dabei, den Übergangspunkt von leichtem zu schwerem Verschleiß zu identifizieren, der als Fresslastgrenze angesehen wird.

Maßstabilität

Ein weiteres wichtiges Merkmal des Lagerwerkstoffs ist die Maßstabilität. NSK prüfte verschiedene Kegelrollenlager, wobei Tough Steel™ sowie durchgehärtete und einsatzgehärtete Werkstoffe eingesetzt wurden. Der Außendurchmesser des L44610-Lagers, das für das Prüfverfahren verwendet wurde, betrug 50,292 mm.

Probestücke aus fünf verschiedenen Materialien wurden 4.000 Stunden lang bei 130 °C im Ofen belassen. Anschließend wurden die Außendurchmesser der Lager gemessen. Ein weiterer Satz an Probestücken aus fünf unterschiedlichen Materialien wurde über 1.000 Stunden bei 170 °C im Ofen belassen. Auch hier wurden im Anschluss die Außendurchmesser der Lager gemessen. Die Maßstabilität von Tough Steel™ liegt zwischen der Maßstabilität von durchgehärteten und der von einsatzgehärteten Lagern.

Die Ergebnisse der einsatzgehärteten, aufgekohlten und karbonitrierten Lager wurden ebenfalls aufgezeichnet, um sie mit den Analysen der Tough-Steel™-Lager zu vergleichen. Das aufgekohlte Lager zeigte ähnliche Ergebnisse wie das Tough-Steel™-Lager, jedoch wies das karbonitrierte Lager in beiden Temperaturbereichen eine erhebliche Ausdehnung des Außenrings auf.

Fazit

1. Bei Lagern, die in Anwendungen mit verunreinigten Schmierstoffen benutzt werden (z. B. in Bergbau-, Gesteins-, Zement- und Stahlwalzwerken), bieten Werkstoffe mit einem großen Anteil an Restaustenit und einem hohen Härtegrad eine längere Lebensdauer.
2. Um derartige Eigenschaften zu erzielen, hat NSK neue Stahlspezifikationen und streng kontrollierte Wärmebehandlungsverfahren entwickelt und realisiert. Das Ergebnis: Der Werkstoff Tough Steel™.
3. Tough Steel™-Lager weisen im Vergleich zu herkömmlichen Lagern unter ähnlichen Verschmutzungs- und Belastungsbedingungen eine mehr als 6-fache Lebensdauer auf.
4. Bei Tough-Steel™-Lagern schreitet die Materialermüdung langsamer voran als bei herkömmlichen Lagern. Die ersten Risse entstehen später, und die Ausbreitung der Risse an der Schulter der Kerbe läuft langsamer ab.
5. Im Test war die Lebensdauer der Tough-Steel™-Lager im Vergleich zu herkömmlichen Lagern 8-mal höher.
6. Tough Steel™-Lager bieten eine bessere Verschleißfestigkeit und eine höhere Fresslastgrenze.
7. Die Maßstabilität liegt zwischen der von durchgehärteten und der von einsatzgehärteten Werkstoffen.

-
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)

Weitere Informationen finden Sie unter www.nskeurope.de