

# TECHNICAL INSIGHT

PUBLIKACJA NSK EUROPE

## Stal TF Tough Steel™ firmy NSK przeznaczona do stosowania w uciążliwych warunkach roboczych

Koncepcja firmy NSK wytwarzania produktów mogących funkcjonować długowiecznie, pomimo pracy w środowiskach zanieczyszczonych, jest unikatowa w przemyśle łożyskowym. Badania firmy NSK po raz pierwszy ujawniły związki pomiędzy zawartością austenitu szczątkowego a trwałością zmęczeniową w środowiskach zanieczyszczonych.

### Kontrola zawadności łożysk w środowiskach zanieczyszczonych

Łożyska pracujące w środowiskach czystych, funkcjonujące w warunkach stosowania smaru o dużej czystości lub podawania wysoce przefiltrowanego oleju, jeżeli są prawidłowo zainstalowane, mogą ewentualnie zawieść ze względu na uszkodzenia zmęczeniowe rozpoczynające się pod powierzchnią materiału. Łożyska narażone na działanie środowiska zanieczyszczonego mogą zawieść ze względu na uszkodzenia zmęczeniowe rozpoczynające się na powierzchni materiału. Stosowanie bardziej czystej stali dowiodło, że jest skuteczniejsze, jeśli chodzi o wydłużanie okresów przewidywanej eksploatacji łożysk pracujących w czystych środowiskach, podczas gdy łożyska typu „czystego po uszczelnieniu” są skuteczniejsze, jeśli chodzi o wydłużanie okresów ich przewidywanej eksploatacji w warunkach pracy w środowiskach zanieczyszczonych.

W górnictwie, w przemyśle wydobywczym żwiru, stalowym i cementowym obecność zanieczyszczeń w łożyskach jest powszechna. Obecność tych zanieczyszczeń inicjuje powstawanie powierzchniowych uszkodzeń zmęczeniowych i skraca żywotność łożysk. Łożyska czyste po uszczelnieniu, w celu uniemożliwienia wnikania szkodliwych zanieczyszczeń do ich wnętrza, wykorzystują uszczelnienia kontaktowe. Niestety łożyska typu zamkniętego nie nadają się



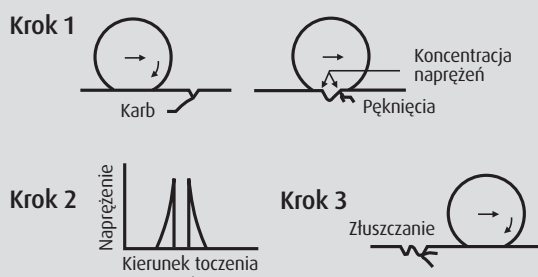
do wszystkich zastosowań, a uszczelki nie zawsze eliminują wszystkie zanieczyszczenia. W tych zastosowaniach wymagane jest wykorzystywanie łożysk wykonanych ze stali Tough Steel™.

### Proces złuszczenia powstający na powierzchni bieżni

Różne rodzaje zanieczyszczeń mogą generować karby na powierzchni bieżni obracających się łożysk. Naprężenia stykowe na krawędziach karbów są ekstremalnie wysokie i uszkodzenia zmęczeniowe powstają w przyspieszonym tempie (**Ilustracja 1**).



#### Ilustracja 1: Początek złuszczenia się zainicjowanego na powierzchni bieżni



### Proces złuszczenia powstający na powierzchni bieżni

Poniższe równanie opisuje koncentrację naprężeń na brzegu karbu. Stosunek maksymalnego naprężenia ścinającego  $t_c$  w obrębie karbu do nominalnego nacisku stykowego  $p_o$ , w przypadku braku karbów jest następujący:

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

gdzie,  $a_1 = 0.22$  i  $a^2 = -0.24$

„Co” oznacza współczynnik ostrości bruzdy i może on zostać wyznaczony w oparciu o następującą formułę:

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

$r$  = promień zaokrąglenia brzegu bruzdy, mm

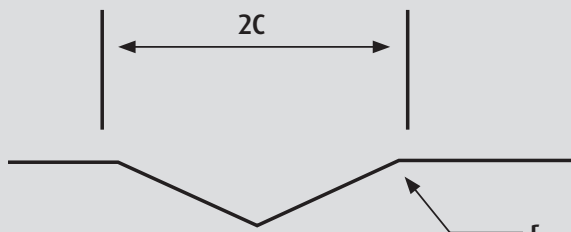
$c$  = połowa szerokości bruzdy, mm

$p_o$  = nominalny nacisk stykowy, N/mm<sup>2</sup>

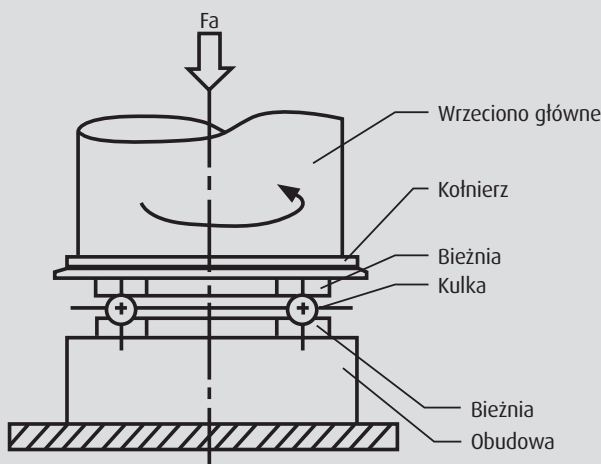
$E^o$  = zredukowany moduł Younga, N/mm<sup>2</sup>

W powyższym równaniu kształt karbu, ze względu na wartości  $r$  oraz  $c$  (**Ilustracja 2**) wywiera silny wpływ na trwałość zmęczeniową łożyska. Wyższe wartości ilorazu  $r/c$  przyczyniają się do uzyskania dłuższej żywotności łożyska ze względu na niską koncentrację naprężeń na krawędzi karbu.

**Ilustracja 2: Powiększony widok karbu spowodowanego obecnością zanieczyszczeń**



**Ilustracja 3: Sekcja wrzeciona maszyny do testów łożysk oporowych**



### Zarys karbu oraz współczynnik materiałowy

W celu wyjaśnienia związków pomiędzy zarysem karbu (iloraz  $r/c$ ) a procentową zawartością austenitu szczątkowego zostały przeprowadzone następujące doświadczenia. Zostało to przeprowadzone na maszynie do prób łożysk oporowych, wykorzystywanej do oceny trwałości zmęczeniowej miejsc styku z elementami tocznymi. Sekcja wrzeciona maszyny do testów łożysk oporowych wraz z próbką została przedstawiona na **Ilustracji 3**.

### Procedura testowa

1. Z szerokiego asortymentu materiałów poddanych różnym procesom obróbki termicznej zostały przygotowane próbki o charakterze podkładek, reprezentujące szeroki zakres twardości oraz zawartości austenitu szczątkowego.
2. Na każdej bieżni testowej został wykonany odcisk za pomocą piramidki Vickersa.
3. Następnie zostały pomierzone wartości  $r$  oraz  $c$  powstające podczas wykonywania odcisku.
4. Każda bieżnia testowa została umieszczona w maszynie do testów i zanurzona w czystej kąpieli olejowej. Naprężenia zostały przyłożone za pomocą obtaczanych nad karbem kulek poddanych określonemu obciążeniu.
5. Zarys karbu został przesłany po wyjęciu próbki z maszyny testowej.

Analiza ilorazu  $r/c$  w odniesieniu do liczby cykli w powyższym teście wykazała, że po wykonaniu 3 000 cykli proporcja  $r/c$  stabilizuje się. Wyniki powyższego testu dowiodły, że po upływie 1 minuty trwania testu (3 000 cykli), wartość  $r/c$  ulega podwyższeniu wraz ze wzrostem zawartości procentowej austenitu szczątkowego. Górna granica zawartości austenitu szczątkowego wynika z warunku stabilności wymiarowej i będzie omówiona w dalszej treści niniejszego dokumentu.

Następnie został przeprowadzony test w wykorzystaniem trzech różnych zestawów próbek. Zestaw NR JEDEN obejmował próbki zawierające 32% austenitu szczątkowego, których twardość wynosiła HV 802. Zestaw NR DWA obejmował próbki zawierające 33% austenitu szczątkowego, których twardość wynosiła HV 716. Zestaw NR TRZY obejmował próbki zawierające 10% austenitu szczątkowego, których twardość wynosiła HV 739. Poprzez porównanie wyników zestawu NR JEDEN i NR TRZY odkryto, że naprężenia powtarzalne wytworzyły wyższą wartość ilorazu  $r/c$  w twardszych materiałach, aniżeli w materiałach bardziej miękkich.

Zauważono również, że relaksacja naprężeń w bardziej miękkich materiałach o niższej zawartości austenitu szczątkowego następuje w stosunkowo krótkim czasie obejmującym wykonanie kilku tysięcy cykli. W celu relaksacji naprężeń ze względu na wzrastającą wartość  $r/c$ , kontynuowano stosowanie coraz twardszych materiałów, o wyższej zawartości austenitu.

## Nowe wymagania materiałowe

Ponieważ austenit szcążkowy sam w sobie jest miękki, wyprodukowanie elementu, który charakteryzowałby się wysoką jego zawartością i jednocześnie byłby twardy, jest trudne. Dlatego wymagane były nowe specyfikacje materiałowe stali. Aby zaspokoić nowe wymagania odnośnie stali, utworzone zostały innowacyjne procesy obróbki cieplnej. Osiągnięto to na drodze podwyższania zawartości chromu w stali, co w rezultacie spowodowało większą ilość drobnych węglików lub węglikoazotków rozproszonych w materiale macierzystym.

Konwencjonalne procesy obróbki cieplnej nie mogą zapewnić uzyskania wymaganych właściwości materiałowych. Proces konwencjonalny oznacza nawęglanie lub hartowanie materiału łożyskowego na wskroś, ponieważ osiągi w zakresie żywotności podczas pracy w środowisku zanieczyszczonym są podobne. Nowe procesy obróbki cieplnej zostały opracowane z myślą o rozdrobnieniu węglików lub węglikoazotków po etapie nawęglania lub węglaozotowania.

W oparciu o wyniki tych studiów, zostały sformułowane nowe specyfikacje materiałowe stali Tough Steel™. Specyfikacje te obejmują zawartość następujących pierwiastków stopowych:

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

## Testy trwałości zmęczeniowej

Inne testy łożysk oporowych zostały przeprowadzone w warunkach smarowania zanieczyszczonymi środkami smarnymi. Wyniki te wskazują, że kontrolowany wzrost zawartości austenitu szcążkowego prowadzi do wydłużenia żywotności łożyska. Ponadto, jeżeli zawartość austenitu szcążkowego jest utrzymywana, lecz rośnie twardość, wówczas możliwa do osiągnięcia staje się jeszcze dłuższa żywotność.

Aby ponownie sprawdzić wymagane parametry materiałowe, z materiałów takich zostały sporządzone łożyska rzeczywiste i przetestowane z zastosowaniem zanieczyszczonych środków smarnych.

Stanowisko testowe na potrzeby tej oceny przedstawione zostało na **Ilustracji 4**. łożyska wykorzystane na potrzeby

tego testu pracowały w zanieczyszczonym oleju przekładniowym. Zanieczyszczenia zostały starannie przemieszane z olejem, a następnie mieszanina ta przepływała przez łożysko testowe. Temperatura oleju była kontrolowana w taki sposób, aby utrzymywać odpowiednią lepkość oleju. łożyska wykonane ze stali Tough Steel™ pracowały pomyślnie przez okres od 7 do 11 razy dłuższy, aniżeli tradycyjne łożyska stożkowe wykonane ze stali do nawęglania lub stali hartowanej na wskroś.

Testy długości okresów eksploatacyjnych głębokorowkowych łożysk kulkowych wykazały, że łożyska wykonane ze stali typu Tough Steel™ wykazują żywotność do 6 razy dłuższą, w porównaniu do tradycyjnych łożysk kulkowych.

## Rozwój procesów zmęczeniowych

W celu przeanalizowania dłuższej żywotności łożysk wykonanych ze stali typu Tough Steel™, wykonane zostały następujące testy przy wykorzystaniu maszyny testowej ze skrzynią o średniej wielkości. Podczas tych testów długowieczności, rozwój powierzchniowych uszkodzeń zmęczeniowych bieżni był mierzony z zachowaniem określonych odstępów czasowych przy wykorzystaniu metod „Analizy zmęczeniowej”. Ta „Analiza zmęczeniowa” jest oryginalną metodą opracowaną przez firmę NSK.

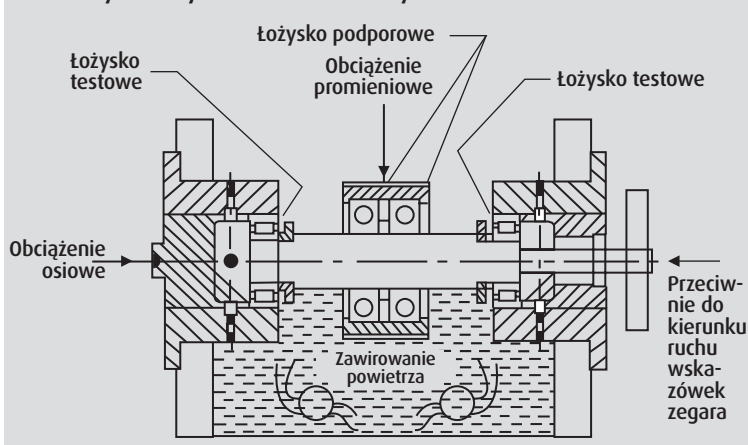
Posługując się metodą dyfrakcji rentgenowskiej, firma NSK wyznaczała rozwój procesu zmęczeniowego w materiale w sposób półilościowy. W miarę rozwoju procesu zmęczeniowego, zachodziły zmiany w martenzytycznej siatce krystalicznej, a austenit szcążkowy ulegał przeobrażeniu w martenzyt. Dokonując pomiaru obu współczynników za pomocą promieni rentgenowskich, możliwe jest określenie rodzaju zmęczenia (powierzchniowego lub podpowierzchniowego) oraz jego stadium w ramach rozwoju procesu zmęczeniowego. W „Analizie zmęczeniowej” mogą zostać przeprowadzone zarówno badania niszczące jak i nieniszczące (defektoskopijne).

W każdym teście przeprowadzane były badania defektoskopijne z zachowaniem określonych odstępów czasowych. W ramach tych inspekcji promienie rentgenowskie wykorzystywane były jedynie w obszarze powierzchni styku elementów tocznych, a ocenie podlegały zmiany w strukturze materiału.

Po przeprowadzeniu testów długowieczności, zostały przeprowadzone badania niszczące z wykorzystaniem analizy rentgenowskiej. Wymagało to zdjęcia bardzo cienkiej warstwy materiału łożyskowego w strefie występowania karbów i zarejestrowania zmian w strukturze materiałowej w obrębie łożyska. Badanie to ujawniło, że pod takim samym obciążeniem i w takich samych warunkach środowiskowych, łożyska wykonane ze stali Tough Steel™ wykazują wolniejszy rozwój procesu zmęczeniowego, aniżeli łożyska tradycyjne.

Test został rozpoczęty za pomocą wykonania karbów modelowych i był prowadzony, aż do rozpoczęcia złuszczenia się bieżni łożyskowej. Odkonano to na drodze wciśnięcia piramidki Vickersa w badaną powierzchnię. Następnie został pomierzony zarys odcisku.

**Ilustracja 4: Stanowisko testowe do łożysk przy wykorzystaniu zanieczyszczonych środków smarnych**



Z kolei łożysko zostało obciążone i został przeprowadzony test długowieczności w warunkach smarowania czystym środkiem smarnym. Łożysko było wyjmowane z maszyny testowej ze skrzynią o średniej wielkości z zachowaniem określonych odstępów czasowych. Powierzchnia była obserwowana pod mikroskopem i mierzony był zarys odcisku. Proces ten był powtarzany, aż do momentu zainicjowania zjawiska złuszczenia się.

Firma NSK odnotowała punkt rozpoczęcia pęknięcia oraz obszar występowania złuszczenia się zarówno w łożyskach wykonanych ze stali Tough Steel™, jak i w łożyskach tradycyjnych. Pojawienie się pęknięć w łożyskach wykonanych ze stali Tough Steel™ było opóźnione, a rozwój złuszczenia się był spowolniony.

Wyniki testów ujawniły, że łożyska wykonane ze stali Tough Steel™ mają brzeg karbu o większym promieniu, aniżeli w przypadku łożysk tradycyjnych. Wyniki te ukazały, że łożyska wykonane ze stali Tough Steel™ wykazują dłuższą żywotność w warunkach smarowania zanieczyszczonymi środkami smarnymi, ponieważ w ich przypadku występuje niższa koncentracja naprężeń w obszarach brzegowych karbów. Różnica w kształcie promienia stanowi przyczynę, ze względu na którą łożyska wykonane ze stali Tough Steel™ wykazują dłuższą żywotność w środowiskach zanieczyszczonych.

#### **Odporność na zużycie ściernie i granica zatarcia**

Łożyska wykonane ze stali Tough Steel™ wykazują większą ilość drobnych węglików i węglikoazotków, która nadaje im wyższą wytrzymałość na zużycie ściernie oraz większą odporność na zatarcie. Wyniki testów stopnia zużycia ściernego oraz granicy zatarcia były określone przez maszynę testową typu Sawin, która została specjalnie zastosowana w celu dokonania oceny odporności na zużycie ściernie.

Wyniki te ukazały, że łożyska wykonane ze stali Tough Steel™ wykazują niższy stopień zużycia i wyższą granicę zatarcia niż łożyska tradycyjne wykonane z materiałów hartowanych na wskroś i nawęglanych. Mimo to, zastosowane obciążenia wydają się niewielkie, maksymalny nacisk styku powierzchniowego wynosił 98 N/mm<sup>2</sup>. Maszyna testowa typu Sawin została zastosowana również z tego powodu, że za jej pomocą można zasymulować warunki pracy „bez smarowania”. Jest to cenna informacja, ponieważ może ona pomóc w identyfikacji punktu przejścia od stanu łagodnego zużycia ściernego do stanu zużycia ostrego, co jest uznawane jako granica zatarcia.

#### **Stabilność wymiarowa**

Inną ważną cechą charakterystyczną materiału łożyskowego jest jego stabilność wymiarowa. Przetestowano kilka różnych rodzajów łożysk stożkowych wykonanych ze stali Tough Steel™, hartowanych na wskroś i nawęglanych. Średnica zewnętrzna wykorzystywanego w teście łożyska typu L44610 wynosiła 50,292 mm.

Próbki pięciu rodzajów materiałów były przetrzymywane w piecu w temperaturze 130°C przez 4 000 godzin, a następnie dokonano pomiaru średnicy zewnętrznej łożysk. Inny zestaw próbek materiałów był przetrzymywany w piecu

w temperaturze 170°C przez 1 000 godzin. Następnie dokonano pomiaru średnicy zewnętrznej łożysk. Stabilność wymiarowa łożysk wykonanych ze stali Tough Steel™ mieści się pomiędzy stabilnością łożysk ze stali hartowanej na wskroś, a łożysk ze stali nawęglanej.

Wyniki łożysk wykonanych z materiałów hartowanych powierzchniowo, nawęglanych i węglaozotowanych zostały również przedstawione na wykresie i zawierają porównanie w stosunku do łożysk wykonanych ze stali Tough Steel™. Wyniki uzyskane w stosunku do łożysk wykonanych z materiałów nawęglanych okazały się podobne do łożysk wykonanych ze stali Tough Steel™ lecz łożyska z materiałów węglaozotowanych wykazały w obu zakresach temperaturowych bardzo dużą rozszerzalność cieplną pierścienia zewnętrznego.

#### **Wniosek**

1. W przypadku łożysk użytkowanych w zastosowaniach, w których występuje smarowanie zanieczyszczonymi środkami smarnymi w warunkach takich, jakie są spotykane w górnictwie, w przemyśle wydobywczym żwiru, stalowym i cementowym, stosowanie materiałów charakteryzujących się dużą zawartością austenitu szczątkowego i wysoką twardością przedłuża żywotność łożysk.
2. W celu uzyskania takich właściwości zostały opracowane i wdrożone nowe specyfikacje stali oraz metody ściśle kontrolowanej obróbki cieplnej, umożliwiające wyprodukowanie materiału pod nazwą Tough Steel™.
3. Łożyska wykonane ze stali Tough Steel™ wykazują 6-krotnie dłuższą żywotność w porównaniu do łożysk tradycyjnych, użytkowanych w podobnych warunkach zanieczyszczenia i obciążenia.
4. Łożyska wykonane ze stali Tough Steel™ wykazują wolniejsze tempo rozwoju procesów zmęczeniowych. Inicjacja pęknięć jest opóźniona, a ich propagacja w brzegowej części karbu jest wolniejsza.
5. Łożyska wykonane ze stali Tough Steel™ w porównaniu do testów żywotności rzeczywistej wykazują 8-krotnie dłuższą żywotność od łożysk tradycyjnych.
6. Łożyska wykonane ze stali Tough Steel™ oferują korzyści zarówno w zakresie odporności na zużycie ściernie jak też w odniesieniu do granicy zatarcia.
7. Stabilność wymiarowa tych łożysk mieści się pomiędzy stabilnością łożysk hartowanych na wskroś, a łożysk nawęglanych.

- 
1. Murakami, Y., i Matsumoto, Y. „Study of Long Life Bearing Materials” (Studium materiałowe łożysk długowiecznych), preprinty z Konferencji Trybologicznej JAST, Okayama (1988), 297-300. [W języku japońskim.]
  2. Chiu, Y. P., i Liu, J. Y. „An Analytical Study of the Stress Concentration Around a Furrow Shaped Surface Perfect in Rolling Contact” (Studium analityczne koncentracji naprężeń wokół powierzchni z bruzdą zapewniającą doskonały styk z elementami tocznymi). Tłum. ASME, JOLT (1970), 258-263.
  3. Tanaka, L., Furumura, K., i Ohkuma, T. „Highly Extended Life of Transmission Bearings of Sealed-Clean Concept” (Znacznie przedłużona żywotność łożysk przekładniowych pracujących w warunkach czystych po uszczelnieniu), biuletyn SAE 830570 (1983)..
  4. Yasuo Murakami i Takaaki Shiratani „Fighting Debris: Increasing Life with HTF Bearings for Transmissions” (Zwalczanie zanieczyszczeń: Wydłużanie żywotności łożysk przekładniowych wykonanych z materiału HTF), biuletyn SAE nr 940728 (1984).
- 

**W celu uzyskania większej ilości informacji, zapraszamy na naszą stronę internetową [www.nskeurope.pl](http://www.nskeurope.pl)**