

## Uszkodzenia łożysk i ich przyczyny

### Część II

W związku ze wzrostem zainteresowania sposobami zapobiegania powtarzającym się uszkodzeniom łożysk, Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (ISO) stworzyła metodologię klasyfikowania uszkodzeń łożysk (ISO 15243:2004). Ta norma określa sześć głównych grup rodzajów uszkodzeń i szesnaście podgrup. Wszystkie odnoszą się do uszkodzeń, do których doszło podczas użytkowania, czyli od momentu opuszczenia fabryki. Klasyfikacja opiera się głównie na charakterystycznych cechach, które są widoczne na elementach tocznych, bieżniach i innych funkcjonalnych powierzchniach łożyska. Norma identyfikuje także mechanizmy związane z powstaniem każdego typu uszkodzenia.

Większość uszkodzeń łożysk może zostać powiązana zarówno z jedną z sześciu głównych grup uszkodzeń, jak i jedną z podgrup przedstawionych w tab. I. Definicje rodzajów uszkodzeń są przedstawione w tab. II.

Większość uszkodzeń będących skutkiem działania przedstawionych mechanizmów może zostać łatwo wykryta i zdiagnozowana, jeżeli kontrola stanu maszyn jest częścią kompleksowego programu utrzymania ruchu. Przy użyciu analizy drganiowej można wykryć pierwsze oznaki uszkodzenia łożyska, co pozwala personelowi działu utrzymania ruchu na podjęcie działań naprawczych we właściwym czasie. Dzięki temu można znacznie ograniczyć kosztowne, niespodziewane przestoje i uniknąć katastrofalnych awarii, które powodują uszkodzenia

sąsiadujących z łożyskiem elementów. Istnieje także możliwość zbadania uszkodzenia łożyska na wczesnym etapie, aby określić przyczynę pierwotną uszkodzenia i podjąć odpowiednie kroki zapobiegające ponownemu wystąpieniu problemu.

Znaczna część uszkodzeń łożysk może zostać zaklasyfikowana do dwóch kategorii: uszkodzenia przedeksploatacyjne i eksploatacyjne. Do uszkodzeń przedeksploatacyjnych dochodzi przed lub w czasie montażu łożyska, podczas gdy uszkodzenia eksploatacyjne pojawiają się w czasie pracy łożyska.

Przyczyny uszkodzeń przedeksploatacyjnych:

- nieprawidłowe pasowanie na wale i w oprawie,
  - uszkodzone gniazdo łożyska na wale i w oprawie,
  - niewspółosiowość statyczna,
  - nieprawidłowe sposoby montażu,
  - przepływ prądu elektrycznego przez łożysko (nadmierne napięcie),
  - transport, obsługa i przechowywanie.
- Przyczyny uszkodzeń eksploatacyjnych:
- zmęczenie materiału,
  - nieodpowiednie smarowanie,
  - nieskuteczne uszczelnienia,
  - drgania (fałszywe odciski *Brinella*),
  - niewspółosiowość podczas pracy,
  - przepływ prądu elektrycznego przez łożysko.

### Przedeksploatacyjne przyczyny uszkodzeń

*Nieprawidłowe pasowania na wale i w oprawie*

Efektem nieprawidłowego pasowania na wale lub w oprawie może być albo nadmierny luz albo zbyt duże napięcie wstępne łożyska,

które mogą doprowadzić do wystąpienia jednej z następujących sytuacji:

- pełzanie pierścienia (pierścień obraca się w miejscu osadzenia),
- korozja cierna,
- pęknięcie pierścieni,
- zmniejszenie nośności,
- wywołanie obciążeń wewnętrznych,
- nadmierne temperatury pracy.

Dlatego prawidłowe pasowanie jest najważniejszym czynnikiem wpływającym na trwałość eksploatacyjną łożyska i pracę całego urządzenia.

Jeżeli pierścień łożyska wiruje, a obciążenie jest stałe i działa w jednym kierunku, wymagane jest pasowanie ciasne pierścienia. Stopień wcisku jest uzależniony od wielkości obciążenia oraz rodzaju i rozmiaru łożyska. Zazwyczaj im większe obciążenie działa na łożysko, tym wymagane jest ciśniejsze pasowanie.

Jeżeli pierścień łożyska jest nieruchomy, a obciążenie jest stałe i działa w jednym kierunku, pierścień jest zwykle osadzany z pasowaniem luźnym.

Występowanie obciążeń udarowych lub ciągłych drgań wymaga zastosowania ciśniejszego pasowania pierścienia, który wiruje względem obciążenia.

Tabela 1

#### Klasyfikacja ISO rodzajów uszkodzeń łożysk

Grupa główna	Podgrupa
Zmęczenie materiału	Zmęczenie materiału zapoczątkowane pod powierzchnią Zmęczenie materiału zapoczątkowane na powierzchni
Zużycie	Zużycie ściernie Zużycie przyłgowe
Korozja	Korozja od wilgoci Korozja w wyniku tarcia Korozja cierna Fałszywe odciski Brinella
Erozja elektryczna	Nadmierne napięcie Upływ prądu
Odształcenie plastyczne	Przeciążenie Wgniecenie cząstek zanieczyszczeń Wgniecenie w wyniku nieprawidłowej obsługi
Pęknięcie i przetłamanie	Pęknięcie wymuszone Pęknięcie zmęczeniowe Pęknięcie termiczne

Tabela 2

Rodzaj uszkodzenia	Definicja i/lub objaśnienie
<b>Zmęczenie materiału</b>	Zmiana w strukturze materiału spowodowana przez powtarzające się naprężenia występujące w miejscach styku między elementami tocznymi a bieżniami. Zmęczenie objawia się w postaci łuszczenia – odłupywania się cząstek materiału od powierzchni. Czas od rozpoczęcia łuszczenia do osiągnięcia stanu zaawansowanego zmienia się w zależności od prędkości i obciążenia.
Zmęczenie materiału zapoczątkowane pod powierzchnią	Zapoczątkowanie mikropęknięć pod powierzchnią bieżni. Kiedy te mikropęknięcia rozprzestrzeniają się do powierzchni następuje łuszczenie.
Zmęczenie materiału zapoczątkowane na powierzchni	Mikropęknięcia powierzchniowe. Uszkodzenia wierzchołków mikronierówności (chropowatości) powierzchni metalu w miejscu styku tocznego spowodowane niewystarczającym smarowaniem.
<b>Zużycie</b>	Postępujące usuwanie materiału, będące rezultatem wzajemnego oddziaływania dwóch stykających się powierzchni wykonujących w czasie pracy ruch ślizgowy lub toczny/ślizgowy.
Zużycie ściernie	Wynik niewystarczającego smarowania lub wniknięcia zanieczyszczeń do łożyska.
Zużycie przylgowe	Przenoszenie materiału z jednej powierzchni na drugą z równoczesnym generowaniem ciepła w czasie tarcia, czasami połączone z odpuszczaniem lub powtórным hartowaniem powierzchni.
<b>Korozyja</b>	Pogarszanie się stanu powierzchni metalu w rezultacie utleniania lub reakcji chemicznej na powierzchni metalu.
Korozyja od wilgoci	Utlenianie powierzchni w obecności wilgoci.
Korozyja w wyniku tarcia	Reakcja chemiczna uaktywniona przez względne mikroruchy między współpracującymi powierzchniami w pewnych warunkach tarcia.
Korozyja cierna	Utlenianie i zużycie wierzchołków mikronierówności powierzchni w warunkach występowania mikroruchów oscylacyjnych.
Fałszywe odciski Brinella	Tworzenie się płytkich wgłębień w rezultacie mikroruchów spowodowanych przez cykliczne drgania, gdy maszyna jest w stanie spoczynku. Na bieżniach pojawiają się równomiernie rozłożone wgłębienia w odległościach odpowiadających rozstawowi elementów tocznych.
<b>Erozyja elektryczna</b>	Uszkodzenie stykających się powierzchni (usuwanie materiału) spowodowane przepływem prądu elektrycznego.
Nadmierne napięcie	Iskrzenie i miejscowe nagrzewanie spowodowane przepływem prądu w miejscu styku, wynikające z nieskutecznej izolacji.
Upływ prądu	Tworzenie się płytkich kraterów w wyniku przepływu prądu o małym natężeniu. Kratery są położone blisko siebie. Z biegiem czasu rozwijają się rowki równoległe do osi obrotu, które są równomiernie rozłożone.
<b>Odształcenie plastyczne</b>	Odształcenie trwałe, które pojawia się, gdy granica plastyczności materiału zostaje przekroczona.
Przeciążenie	Przeciążenie spowodowane działaniem obciążeń statycznych lub uderowych, prowadzące do odształcenia plastycznego (prawdziwe odciski Brinella).
Wgniecenie cząstek zanieczyszczeń	Cząstki zanieczyszczeń, po których przetaczają się elementy toczne tworzą w miejscach styku wgniecenia w bieżniach i elementach tocznych. Wielkość i kształt wgnieceń zależą od własności fizycznych cząstek zanieczyszczeń.
Wgniecenie w wyniku nieprawidłowej obsługi	Powierzchnie łożyska są wgniecione lub nacięte poprzez twarde, ostre przedmioty.
<b>Pęknięcia</b>	Wytrzymałość materiału na rozciąganie zostaje przekroczona i następuje całkowite oddzielenie części elementu.
Pęknięcia wymuszone	Pęknięcia będące rezultatem koncentracji naprężeń przekraczającej wytrzymałość materiału na rozciąganie.
Pęknięcia zmęczeniowe	Pęknięcia będące rezultatem częstego przekraczania granicy wytrzymałości zmęczeniowej materiału.
Pęknięcia termiczne	Pęknięcia będące efektem ciepła powstającego przy wysokim tarcu. Zwykle są prostopadłe do kierunku ruchu ślizgowego.

W przypadku pierścienia łożyska z wirującą strefą obciążenia, łożysk lekko obciążonych lub łożysk pracujących z bardzo małymi prędkościami, można zastosować mniej ciasne pasowanie lub w niektórych przypadkach pasowania luźne.

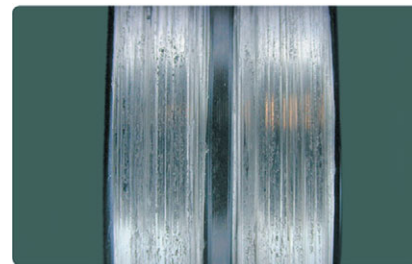
Rozważmy dwa przykłady: W kole przednim samochodu kierunek obciążenia jest stały, tj. powierzchnia drogi zawsze wywiera siłę skierowaną ku górze na koło. Tak więc wirujący pierścień zewnętrzny ma pasowanie ciasne w piaście koła, natomiast nieruchomy pierścień wewnętrzny ma pasowanie luźne na osi.

Łożyska w konwencjonalnym silniku elektrycznym mają pierścienie zewnętrzne nieruchome względem obciążenia i są pasowane luźno w oprawie, ale pierścienie wewnętrzne wirują względem obciążenia i są montowane z pasowaniem ciasnym.

W niektórych przypadkach, zarówno pierścienie wewnętrzne, jak i zewnętrzne łożyska należy zamontować z pasowaniem ciasnym. Dotyczy to na przykład łożysk walcowych i łożysk toroidalnych CARB, które mogą kompensować wydfuzienie osiowe wału wewnątrz łożyska, w odróżnieniu od sytuacji,

gdy razem z wałem przesuwa się luźno pasowany w swoim gnieździe pierścień łożyska. Ciasne pasowanie obu pierścieni łożyska może także występować w aplikacjach, w których występują wysokie obciążenia udarowe.

Nieprawidłowe pasowania na wale lub w oprawie, lub pasowania, które są niepotrzebnie luźne, mogą spowodować, że pierścień wewnętrzny lub zewnętrzny zacznie się obracać w miejscu osadzenia. Ten względny ruch nazywany jest pełzaniem pierścienia. Przemieszczenia względne wywołują tarcie i mogą spowodować zużycie lub zatarcia. Uszkodzenie nie zawsze jest ograniczone do powierzchni gniazda łożyska, ale może mieć wpływ na powierzchnie czołowe pierścienia (pierścieni). Na rys. 1 przedstawiono zużycie ściernie, natomiast na rys. 2 jest pokazane zużycie przez polerowanie.



Rys. 1. Zużycie ściernie spowodowane pełzaniem pierścienia zewnętrznego; klasyfikacja ISO: zużycie ściernie

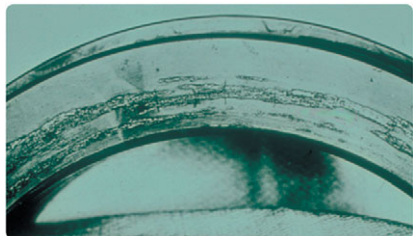


Rys. 2. Zużycie przez polerowanie powierzchni spowodowane pełzaniem pierścienia zewnętrznego; klasyfikacja ISO: zużycie ściernie

W przypadku zbyt luźnych pasowań może wystąpić różnica prędkości między stykającymi się powierzchniami. Czasami luźnego pasowania nie da się uniknąć, na przykład w przypadku łożysk stożkowych czterzędowych osadzonych na czopach walców w walcarkach. Zazwyczaj pierścienie wewnętrzne ma pasowanie luźne w po-



wodu montażu/demontażu. Z powodu pasowania luźnego występuje różnica prędkości między pierścieniem wewnętrznym i gniazdem na wale (pełzanie) oraz między powierzchnią czołową pierścienia wewnętrznego i jego oparciem. Te różnice prędkości w strefie styku powodują wydzielanie ciepła. W niektórych przypadkach miejscowe nagrzewanie może być tak intensywne, że dojdzie do przeniesienia materiału z pierścienia łożyska na powierzchnię, względem której występuje poślizg lub na



Rys. 3. Różnice prędkości w miejscu styku między łożyskiem a pierścieniem dystansowym spowodowały zatarcia (ślady obwodowe), powstające ciepło wywołało pęknięcia termiczne w pierścieniu łożyska (prostopadłe do śladów zatarć); klasyfikacja ISO: zużycie przyłogowe i pęknięcie termiczne



Rys. 4. Pęknięcie pierścienia spowodowane nadmiernym wciskiem; klasyfikacja ISO: pęknięcie wymuszone



Rys. 5. Pasowanie w oprawie, które jest zbyt ciasne dla łożyska swobodnego wywoła wysokie obciążenia osiowe, drastycznie zmniejszające trwałość eksploatacyjną łożyska; klasyfikacja ISO: zmęczenie materiału zapoczątkowane pod powierzchnią (z powodu zbyt dużych obciążeń) lub zmęczenie materiału zapoczątkowane na powierzchni (wynikające z problemów ze smarowaniem)

odwrot (zacieranie) – rys. 3. Ciepło może także wywołać pęknięcia termiczne w materiale, które ostatecznie spowodują pęknięcie pierścienia (pęknięcie termiczne).

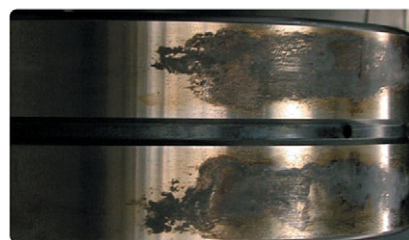
Pasowanie ciasne między pierścieniem wewnętrznym a wałem wywoła naprężenia obwodowe (rozciągające) w pierścieniu. Jeżeli wcisk jest zbyt duży, wynikowe naprężenia obwodowe mogą przekroczyć wytrzymałość pierścienia i spowodować jego przełamanie (rys. 4).

Łożyskowania zazwyczaj składają się z łożyska ustalającego i łożyska swobodnego. Łożysko swobodne ma za zadanie kompensować wydłużenie termiczne wału, w obrębie łożyska, albo przez przesuwania

## Uszkodzenia spowodowane wadliwym gniazdem na wale lub w oprawie

Wzory stosowane do obliczenia trwałości łożyska oparte są na pewnych podstawowych założeniach. Jednym z tych założeń jest spełnianie przez gniazdo na wale i w oprawie wymagań dotyczących geometrii. Niestety, istnieją czynniki, które mogą negatywnie wpłynąć na elementy wykonane zgodnie z najbardziej wymagającymi specyfikacjami. Na przykład, gniazda na wale i w oprawie mogą być zdeformowane, tj. stożkowe, nieokrągłe (owalne), nieprostopadłe lub odkształcone na ramie maszyny lub na powierzchni osadzonej.

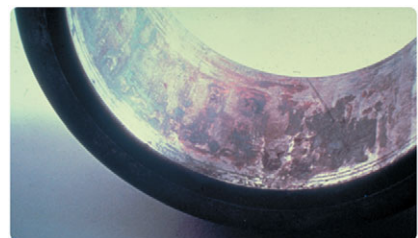
Korozja cierna występuje, gdy pasowanie jest zbyt luźne i dochodzi do względnego ruchu między pierścieniem łożyska a wałem lub oprawą. Ten ruch względny, który jest zazwyczaj spowodowany przez niedokładności kształtu lub ugięcie wału, powoduje odrywanie małych cząstek materiału od powierzchni



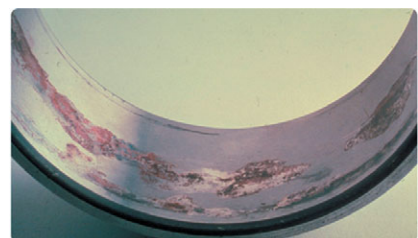
Rys. 6. „Silna” korozja cierna występuje często w mocno obciążonych aplikacjach – korozja cierna jest w strefie obciążenia gniazda pierścienia zewnętrznego; klasyfikacja ISO: korozja cierna

nie się razem z wałem w swoim gnieździe w oprawie. Aby pierścień zewnętrzny mógł się przesunąć w oprawie, musi on być osadzony z pasowaniem luźnym. Jeśli pasowanie jest zbyt ciasne lub gdy pierścień zostanie zakleszczony w oprawie, pierścień nie będzie się mógł poruszyć. To wywoła wysokie obciążenia osiowe w systemie łożyskowym. Te siły osiowe mogą doprowadzić do wystąpienia jednej z następujących sytuacji: przedwczesne zmęczenie materiału, nadmierne grzanie, niewystarczające smarowanie, nadmierne zużycie lub łuszczenie zapoczątkowane na powierzchni – rys. 5. W rezultacie drastycznie spada trwałość eksploatacyjna łożyska.

gniazda na wale lub w oprawie. Te cząstki ulegają szybkiemu utlenieniu, gdy są wystawione na działanie powietrza. W efekcie korozji czarnej pierścień łożyska mogą nie być równomiernie podparte, co będzie miało szkodliwy wpływ na rozkład obciążenia w łożysku. Korozja cierna pojawia się jako rdza na powierzchni zewnętrznej pierścienia zewnętrznego (rys. 6) lub na powierzchni otworu pierścienia wewnętrznego (rys. 7 i 8). Tlenek żelaza ma większą



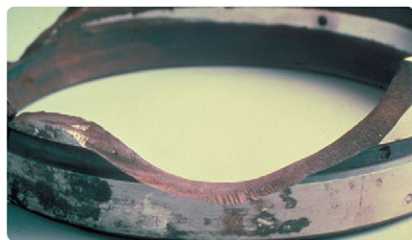
Rys. 7. Korozja cierna jako efekt nieprawidłowego pasowania na wale; klasyfikacja ISO: korozja cierna



Rys. 8. Korozja cierna wynikająca albo z niedoskonałego gniazda na wale (błędna obróbka), albo z ugięcia wału; klasyfikacja ISO: korozja cierna

objętość niż czyste żelazo. Dlatego geometria łożyska może ulec zmianie; ślady współpracy na bieżni mogą zostać wyraźnie zaznaczone w odpowiadających im miejscach. Korozja cierna jest powszechnie spotykana w zastosowaniach, gdzie występują warunki pracy powodujące odkształcanie gniazd łożyskowych pod obciążeniem. Taka sytuacja często występuje w silnie obciążonych aplikacjach.

Korozja cierna  $Fe_3O_4$ , zwana także magnetytem (rys. 6), może być czarna, a  $Fe_2O_3$ , zwana także hematyt-



Rys. 9. Korozja cierna może doprowadzić do pęknięcia pierścienia, pierścień pęka w swoim najślabszym punkcie – rowku smarownym; klasyfikacja ISO: korozja cierna i pęknięcie wymuszone



Rys. 10. Pierścień zewnętrzny tego łożyska nie był prawidłowo podparty w gnieździe oprawy, korozja cierna doprowadziła do wysokich naprężeń w pierścieniu zewnętrznym i ostatecznie jej rezultatem było pęknięcie wymuszone pierścienia; klasyfikacja ISO: korozja cierna i pęknięcie wymuszone



Rys. 11. Pierścień zewnętrzny tego łożyska kulkowego wahliwego jest umieszczony naprzeciwko lustra, można zauważyć dwie strefy obciążenia i łuszczenie oddalone o 180°, uszkodzenie było skutkiem nieokrągłego gniazda oprawy; klasyfikacja ISO: zmęczenie materiału zapoczątkowane pod powierzchnią

tem, czerwona lub czerwonawo-brązowa (rys. 7 i 8).

Z upływem czasu, na skutek nieprawidłowego styku pojawi się zaawansowana korozja cierna. Skorodowane obszary działają także jak karby powodujące pęknięcie (rys. 9 i 10).

Gniazda łożyskowe, które są wklęsłe, wypukłe lub stożkowe powodują, że pierścień łożyskowy ma niewystarczający styk z powierzchnią osadzenia wzdłuż swojej szerokości. Z tego powodu pierścień ugina się pod obciążeniem i często dochodzi do pęknięć zmęczeniowych na obwodzie bieżni.

Na rys. 11 przedstawiono pierścień zewnętrzny łożyska kulkowego wahliwego, który był zamontowany w nieokrągłym (owalnym) otworze oprawy oraz jego odbicie w lustrze. Nieruchomy pierścień zewnętrzny był zaciśnięty w dwóch miejscach – oddalonych o 180° – przez co w tych dwóch obszarach doszło do napięcia wstępnego łożyska. To obciążenie wstępne wywołało nadmierne siły, których skutkiem było przedwczesne zmęczenie materiału i łuszczenie zapoczątkowane pod powierzchnią.

SKF Polska – sierpień 2011

## Satellite EASy – cyfrowy radiomodem

ASTOR oferuje w pełni cyfrowy radiomodem firmy SATEL, który pozwala na programową zmianę parametrów ustawianych dotychczas fabrycznie przez producenta. Użytkownik może teraz sam zdefiniować m.in. takie parametry, jak: częstotliwość pracy (od 403 do 473 MHz), szerokość kanału (12,5 lub 25 kHz), moc nadajnika (od 100 mW do 1 W) oraz czułość (do -115 dBm).

Satellite EASy składa się z modemu, nadajnika oraz odbiornika radiowego, umieszczonych w aluminiowej obudowie. Wyposażony jest w gniazdo portu szeregowego (RS232, RS422/485) oraz złącze antenowe typu TNC. Na obudowie umieszczony jest zestaw diod, informujących o stanie linii sygnałowych portu szeregowego. Urządzenie jest w pełni kompatybilne z radiomodemami Satellite 3AS(d), Satellite 3AS(d) Epic oraz z rozwiązaniami firmy PacificCrest (TrimTalk, Trimble) stosowanymi w układach GPS (systemy geodezyjne, budownictwo drogowe, górnictwo, lotnictwo).

Radiomodem pracuje w paśmie licencjonowanym 400 – 470 MHz, co pozwala na użycie niezależnej, „własnej” częstotliwości. Zasięg komunikacji urządzeń może dochodzić do kilkunastu kilometrów (przy zastosowaniu retransmiterów sygnału może być dowolnie zwiększany). Radiomodemy umożliwiają ciągłą transmisję danych on-line, a ponadto sieć radiowa jest własnością danego przedsiębiorstwa.

Satellite EASy dostępny jest także w wersji rozbudowanej z wyświetlaczem ciekłokrystalicznym oraz

czteroprzyciskową miniklawiaturą, umożliwiającą zmianę wszystkich ustawień urządzenia, bez konieczności podłączania komputera i wykorzystywania programu terminalowego. Dodatkowo, na ekranie wyświetlana jest aktualna wartość poziomu sygnału odbieranego (RSSI),



informująca o jakości połączenia radiomodemowego. Jest to szczególnie przydatne podczas testów komunikacji, przeprowadzanych w celu optymalnego doboru anten, miejsca montażu stacji, wysokości masztu i innych.

Zmiana konfiguracji urządzenia może odbywać się z poziomu dowolnego programu terminalowego. *Zalecanym środowiskiem jest udostępniane bezpłatnie oprogramowanie SaTerm.*