

# Wybrane problemy materiałowych badań łożysk tocznych przystosowanych do pracy w podwyższonych temperaturach

## Selected issues of materials testing of rolling bearings adapted to work in elevated temperatures



**Krzysztof Łęczycki**

Mgr inż.

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

krzysztof.leczycki@itwl.pl

**Streszczenie:** Łożyska toczne wykorzystywane w budowie turbinowych silników lotniczych są jednym z krytycznych elementów w ich konstrukcji, przez co uszkodzenie łożysk może w najgorszym przypadku może doprowadzić do katastrofy lotniczej. Dlatego ważne jest, aby wyjaśniać oraz eliminować przyczyny ich awarii. W niniejszym opracowaniu omówiono wybrane materiałowe badania dwóch uszkodzonych w latach 2016 i 2017 łożysk tocznych z silników turbinowych jednego typu lekkiego śmigłowca. Przedstawiono wyniki badań makroskopowych, mikrostruktury, twardości oraz składu chemicznego. Uzyskane wyniki porównano z badaniami z lat wcześniejszych.

**Słowa kluczowe:** Łożyska toczne; Turbinowe silniki lotnicze; Uszkodzenia łożysk tocznych; Badania materiałowe

**Abstract:** Rolling bearings are crucial component of aviation turbine engines. Bearing failure may, in worst case, lead to an engine failure and aircraft disaster. Therefore, investigation of their causes and subsequent risk factors elimination are of utmost importance. In the present study, selected materials testing issues of two rolling bearings from light rotorcraft turbine engines failures (in accidents of 2016 & 2017) are discussed. Results of macroscopic, hardness tests, microstructure and chemical assay are presented. The obtained data are compared with results of previous studies on the subject.

**Keywords:** Rolling bearings; Aviation turbine engine; Rolling bearings failure; Materials testing

Łożyska toczne są jedną z krytycznych elementów konstrukcji silników lotniczych. Ich wady konstrukcyjne i materiałowe, zanieczyszczenia lub nieprawidłowa eksploatacja może doprowadzić do uszkodzenia konstrukcji statku powietrznego w czasie lotu, a tym samym do utraty życia lub zdrowia załogi. Z tego powodu konstrukcje oraz materiały łożysk silników lotniczych muszą wykazywać wystarczającą odporność na specyficzne warunki pracy silników: wysokie prędkości obrotowe wałów (rzędu 104 obr/min), drgania, momenty zginające, [1], wysoką temperaturę.

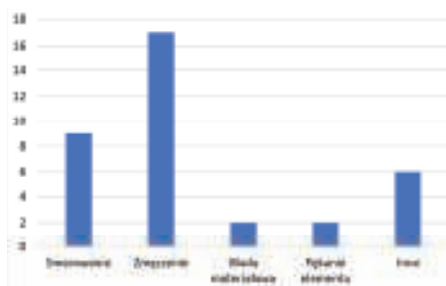
Do konstrukcji łożysk przeznaczonych do silników lotniczych wykorzystuje się wysoko stopowe stale z podwyższoną zawartością chromu, molibdenu, wolframu, wanadu przypominające składem chemicznym oraz właściwościami szybko tnące stale narzędziowe. Obecność pierwiastków stopowych tworzących wysokotopliwe węgliki (wolfram, molibden, wa-

nad) zwiększa stabilność termiczną struktury materiału w porównaniu do niskostopowych stali. Strukturę materiału po hartowaniu i kilkukrotnym odpuszczaniu w temperaturze ok. 550°C stanowi martenzyt z austenitem szczytkowym, węglnikami pierwotnymi oraz wtórnymi. Materiał po procesie ulepszania cieplnego zachowuje twardość stali po bezpośrednim hartowaniu ze względu na zjawisko powstawania stopowych węglików. Tego typu stale zachowują po obróbce cieplnej zbliżoną twardość do ok. 500 °C. Stale przeznaczone na łożyska do pracy w podwyższonych temperaturach powinny zawierać możliwie mało austenitu szczytkowego po procesie hartowania, minimalną ilość zanieczyszczeń oraz węgliki o niezbyt dużych rozmiarach, które mogą być przyczyną przyspieszonego zużycia zmęczeniowego bieżni łożysk. [1]

W Pracowni Materiałoznawstwa Lotniczego ITWL (dawniej Zakładu Inżynierii Materiałowej) w ciągu ok 50-ci

lat wykonano wiele ekspertyz dotyczących uszkodzeń łożysk tocznych w silnikach turbinowych statków powietrznych. Liczną grupę 36-ciu przypadków stanowiły łożyska wałów sprzężarek z silników lekkiego śmigłowca, których elementy toczne i pierścienie wykonano z wysokostopowych stali Cr-W-V do pracy w podwyższonych temperaturach.

Rys. 1 przedstawia zestawienie liczby badanych łożysk w zależności od typu uszkodzenia łożyska, w których wyróżniono uszkodzenia spowodowane: nieprawidłowym smarowaniem łożysk, zmęczeniowym wykruszaniem bieżni, wadami materiałowymi w postaci zbyt dużych węglików, pękaniem elementów konstrukcyjnych łożysk oraz innymi. W ostatniej kategorii zestawiono przypadki: niszczenia łożysk w wyniku działania nadmiernego działania obciążeń wzdłużnych, nadmiernego luzu w łożyskach i zbyt dużych obciążeń, wadliwego wykonania łożyska, powstawania łuków elektrycznych



1. Zestawienie przyczyn uszkodzeń łożysk tocznych turbiny sprężarki lekkiego śmigłowca, (na podstawie archiwum Pracowni Materiałoznawstwa Lotniczego ITWL)

między pierścieniem zewnętrznym a wtryskiwaczem [2]. Najczęściej spotykanymi przyczynami uszkodzeń łożysk były zmęczeniowe wykruszanie bieżni (47%) oraz nieprawidłowe smarowanie łożysk (25%).

Ostatnie przypadki awarii łożysk omawianego typu silnika badano w Pracowni Materiałoznawstwa Lotniczego w latach 2016 i 2017. Obie awarie nastąpiły wskutek nieprawidłowego smarowania łożysk. Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie badań mikrostruktury oraz właściwości mechanicznych materiałów zniszczonych łożysk oraz porównanie ich z dwoma przypadkami zbadanymi w poprzednich latach.

## Materiałowe badania łożysk tocznych. Przypadki z lat 2016 i 2017

W latach 2016 i 2017 odnotowano dwa podobne przypadki samoistnego wyłączenia się jednego z dwóch silników lekkich śmigłowców w czasie rozruchu [3, 4]. Stwierdzono w obydwu przypadkach blokowanie się turbin sprężarek, których przyczyną było uszkodzenie łożyska tej samej podpory silnika. Łożysko badane w roku 2016 na potrzeby niniejszego opracowania określono jako łożysko A, łożysko badane w roku 2017 określono jako łożysko B. Pierścienie i kulki łożysk wykonano ze stali chromowo-wolframowo-wanadowej, natomiast separator wykonano z brązu

aluminowo-żelazowo-niklowego.

W Pracowni Materiałoznawstwa Lotniczego ITWL wykonano następujące badania:

- obserwacje makroskopowe okiem nieuzbrojonym oraz z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego Nikon SMZ 800,
- badania struktury z wykorzystaniem mikroskopu metalograficznego Nikon Eclipse MA200,
- badania składu chemicznego z wykorzystaniem mikroanalizatora rentgenowskiego LINK ISIS L200 sprzężonego ze skaningowym mikroskopem elektronowym JEOL JSM 5400,
- pomiary twardości metodą Vickersa z wykorzystaniem twardościomierza DuraScan 20 Laboratorium Materiałowych Badań Konstrukcji Lotniczych akredytowanym w Polskim Centrum Akredytacji pod numerem AB – 431. Zastosowano następujące obciążenia: 0,5 kG, 1 kG, 10 kG.

## Badania makroskopowe

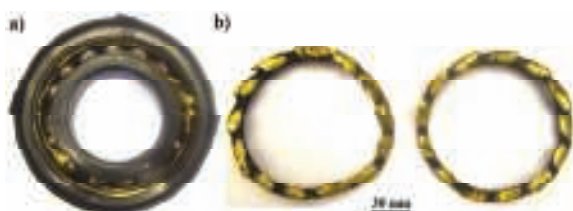
Oba badane obiekty były łożyskami kulkowymi zwykłymi jednorzędowymi z dzieloną bieżnią wewnętrzną. Ich uszkodzenia polegały na rozerwaniu separatorów na dwie części (pęknięcie następowało w najcieńszych miejscach gniazd kulek) oraz ich znacznej deformacji plastycznej ze śladami napierania kulek na gniazda. Bieżnie oraz kulki zostały pokryte warstwą materiału obcego, powierzchnie niepracujące zostały utlenione. Przykład łożyska dostarczonego (łożysko B) do badań pokazano na rys. 2. Łożysko B dostarczono razem z nałożoną na nie tulejką tłumiaczą, natomiast w przypadku łożyska A tulejki tłumiaczej nie dostarczono.

Pomimo dosyć zbliżonego typu uszkodzenia obydwu łożysk wykazują wyraźne różnice. Łożysko B po zablokowaniu ulegało obracaniu względem

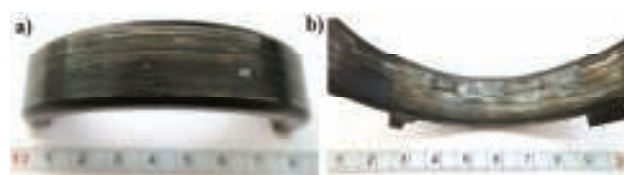
tulejki tłumiaczej, o czym świadczą obwodowe rysy na powierzchni zewnętrznej pierścienia zewnętrznego (rys. 3a) oraz obwodowe rysy i przebarwienia termiczne na wewnętrznej powierzchni tulejki tłumiaczej (rys. 3b). Takich śladów nie stwierdzono w przypadku łożyska A.

Kolejną różnicą jest wygląd warstwy materiału obcego, która została naniesiona na bieżnie zewnętrzne (rys. 4) oraz bieżnie wewnętrzne (rys. 5). W przypadku łożyska A (rys. 4a, 5a) warstwa materiału obcego ma odcień ciemnożółty, jest chropowata oraz zawiera nieciągłości odsłaniające miejscowo powierzchnie bieżni. Ponadto na bieżni zewnętrznej (rys. 4a) widoczne są zgrubienia na warstwie materiału obcego rozłożone w równomiernych odstępach odpowiadającym ułożeniu kulek. Warstwa materiału obcego naniesiona na bieżnie łożyska B (rys. 4b, 5b) jest gładka, niezawierająca nieciągłości, ma niejednorodną barwę: miejscami jest ciemnożółta, miejscami ciemnoszara. Półpierścienie wewnętrzne zostały przez nią połączone (rys. 5b) Przy krawędziach bieżni tworzy większe wypłytki w porównaniu do obserwowanych w łożysku A.

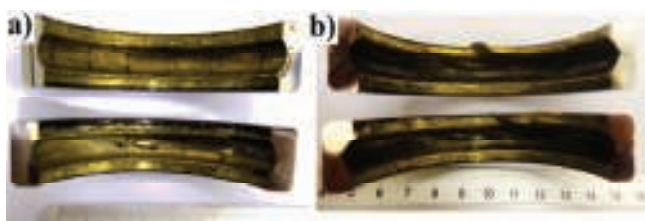
Warstwa materiału obcego została naniesiona również na powierzchni pierścieni zewnętrznych sąsiadujących z zewnętrznymi powierzchniami centrującymi separatorów (rys. 4). W obu przypadkach jej wygląd jest zbliżony: ma jasnożółtą barwę z widocznymi rozplaszczonymi grudkami o tym samym zabarwieniu. Świadczy to razem z obwodowymi rysach na zewnętrznych powierzchniach centrujących obcieraniu separatorów w czasie pracy łożyska o pierścienie zewnętrzne (rys. 6). Fragmenty separatora łożyska B ocenia się jako bardziej odkształcone od łożyska A ze względu na wyraźniejsze wygięcie pierścieni separatora oraz spłaszczenie zniszczonych gniazd kulek.



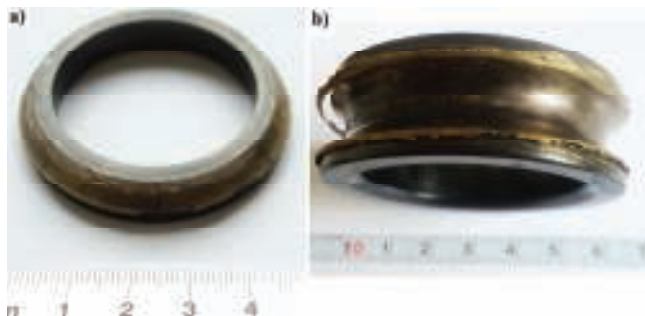
2. Łożysko B w stanie dostarczenia do badań: a) pierścień zewnętrzny, półpierścienie wewnętrzne, kulki, tulejka tłumiacza; b) separator



3. a) Zewnętrzna powierzchnia pierścienia zewnętrznego łożyska B; b) powierzchnia wewnętrzna tulejki tłumiaczej drgania



4. Pierścienie zewnętrzne po przecięciu: a) łożyska A; b) łożyska B



5. a) Jeden z półpierścieni wewnętrznych łożyska A; b) połączone półpierścienie wewnętrzne łożyska B



6. Zewnętrzna powierzchnia centrująca separatora: a) łożyska A; b) łożyska B



7. a) Kulki łożyska A; b) powierzchnia jednej z kulek łożyska A; c) kulki łożyska (jedna z kulek została przecięta)

Kulki obydwu łożysk (rys. 7) mają odmienny wygląd powierzchni – kulki z łożyska A są pokryte materiałem obcym o barwie ciemno-żółtej zbliżonej do obserwowanej w przypadku bieźni, widoczne są podłużne zgrubienia materiału obcego powstałe po oderwaniu kulek od bieźni, widoczne są wykruszenia (rys. 7b), natomiast w przypadku kulek z łożyska B powierzchnia jest ciemna z licznymi śladami wytarcia (rys. 7d).

## Badania struktury, twardości i składu chemicznego

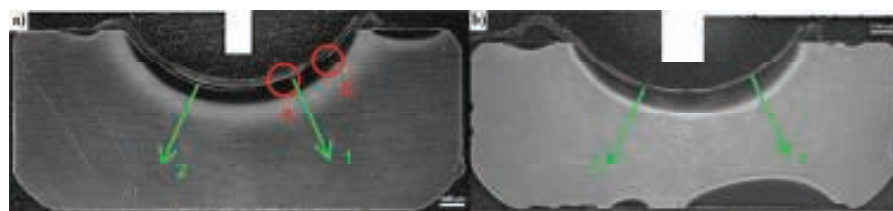
Wykonano szlify metalograficzne z próbek pobranych przekrojów poprzecznych pierścieni zewnętrznych, półpierścieni wewnętrznych oraz kulek. Wszystkie szlify trawiono roztworem 2 % kwasu azotowego w alkoholu etylowym (nital). Po badaniach metalograficznych szlify poddano badaniom twardości.

Na makroskopowych zdjęciach szlifów przekrojów pierścieni zewnętrznych obydwu łożysk (rys. 8) widoczne są strefy degradacji cieplnej (SDC) objawiających się odmiennym sposobem trawienia szlifów oraz warstwy materiału obcy. W przypadku pierścienia zewnętrznego łożyska A (rys. 8a) obserwuje się SDC w całym rejonie bieźni oraz przy krawędziach sąsiadujących z separatorem. Próbkę pierścienia zewnętrznego łożyska B wykazuje więk-

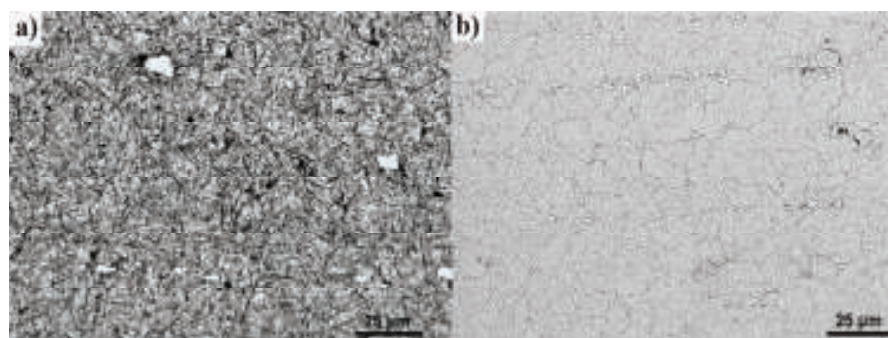
szą liczbę SDC: na jednej z powierzchni czołowych oraz na powierzchni zewnętrznej, co związane jest z obracaniem się pierścienia zewnętrznego względem tulejki tłumiącej. Należy zwrócić uwagę, że obserwowane SDC zwłaszcza w obszarze bieźni nie są symetryczne, szczególnie w przypadku pierścienia zewnętrznego łożyska B. Może być to związane z miejscem przyłożenia maksymalnych sił promieniowych.

Prawidłową mikrostrukturę stalowych części łożyska pokazano na

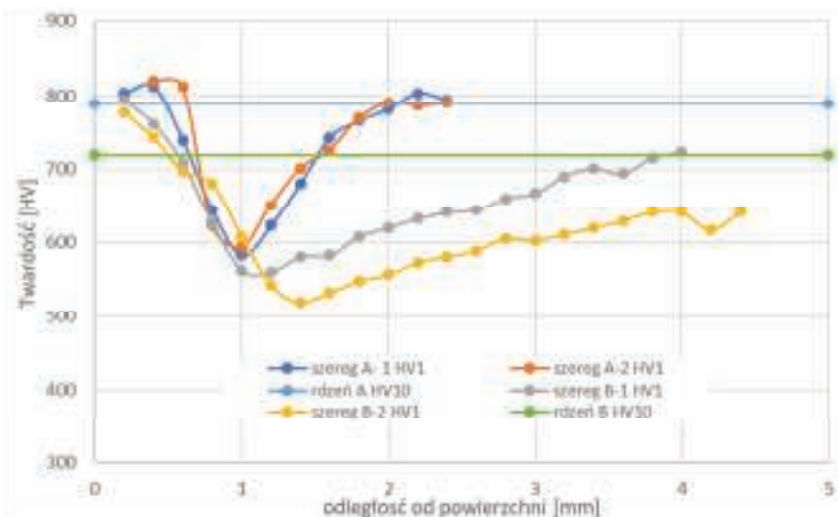
przykładzie rdzenia pierścienia zewnętrznego łożyska A (rys. 9a), którą stanowi odpuszczony martenzyt wraz z węglnikami. Zmierzona twardość wynosi  $789 \pm 11$  HV10, natomiast wymagana twardość wynosi 694-809 HV10. Mikrostrukturę w obszarze przypowierzchniowym strefy degradacji cieplnej pokazano na rys. 9b, stanowi ją nieodpuszczony martenzyt z wydzieleniami węglików. Struktura taka powstaje wskutek wygrzania stali do temperatury austenitacji ( $900-1000^\circ\text{C}$  w przypadku stali stopowych



8. Makroskopowe zdjęcie trawionego nitaliem szlifów metalograficznych przekroju poprzecznego pierścienia zewnętrznego z zaznaczeniem miejsc dalszych obserwacji oraz pomiarów twardości: a) łożyska A; b) łożyska B



9. a) Mikrostruktura rdzenia próbki pierścienia zewnętrznego – mikrostruktura prawidłowa, twardość 789 HV10, b) mikrostruktura przy powierzchni miejscu degradacji cieplnej – mikrostruktura po wtórnym zahartowaniu, twardość 769 HV1



10. Wykres zależności twardości od odległości od powierzchni pierścienia zewnętrznego łożyska A i B z uwzględnieniem twardości zmierzonych w rdzeniu próbek

Cr-W-V) i dostatecznie szybkim studzeniu. Przykładowa twardość zmierzona w takiej strefie wynosi 769 HV1 (rys. 9b).

Głębokość SDC oszacowano wykorzystując liniowe rozkłady twardości (rys. 10), za którą przyjęto odległość od krawędzi przekroju do miejsca osiągnięcia przez materiał twardości w rdzeniu. Mierzone twardości przy krawędzi przekroju w SDC zwykle mają twardość zbliżoną lub większą od twardości materiału w rdzeniu, co jak wspomniano powyżej jest związane z ponownym zahartowaniem materiału. Stopniowe obniżanie temperatury powoduje zachodzenie procesu odpuszczania tzn. wydzielaniem i rozrostem węglików. Minimalny spadek twardości obserwuje się w temperaturze 700-800°C.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że głębokość SDC zmierzona w pierścieniu zewnętrznym łożyska w zbliżonych miejscach pomiarowych jest znacznie większa w porównaniu do łożyska A. w miejscu szeregu 1 materiał nie uzyskuje twardości rdzenia ze względu na bliskość innej SDC (rys. 8b). W miejscu szeregu

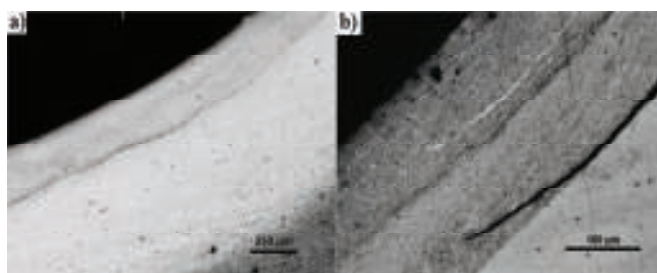
2 uzyskano ok. dwukrotnie większą SDC Twardość zmierzona w rdzeniu pierścienia zewnętrznego łożyska B ( $718 \pm 16$  HV10) jest mniejsza w porównaniu do łożyska A ( $789$  HV10) ze względu na większy obszar zdegradowany cieplnie.

Na rys. 11 pokazano mikrostrukturę warstwy materiału obcego naniesioną na bieżnię zewnętrzną łożyska A w czterech miejscach zgodnie z oznaczeniami na rys. 8a. Warstwa ta różni się budową w zależności od miejsca występowania. W miejscu największego nacisku kulek na bieżnię zewnętrzną (rys. 11a) warstwa materiału obcego ściśle przylega do podłoża. Jest zbudowana z dwóch podwarstw – badania składu chemicznego wykazały, że dolna podwarstwa składa się z pierwiastków wchodzących w skład chemiczny stali łożyskowej (żelazo, chrom, wolfram, wanad), natomiast górna podwarstwa składa się z mieszaniny pierwiastków wchodzących zarówno w skład chemiczny stali łożyskowej oraz materiału separatora (miedź, aluminium, nikiel, żelazo, chrom, wolfram, wanad). Granica rozdzielenia pomiędzy podwarstwami jest słabo widoczna.

W obszarze „b” granica rozdzielenia jest bardziej widoczna, górna podwarstwa zawiera pory oraz cienie wtrącenia o jasnym odcieniu. Charakterystyczna jest również delaminacja. Obie podwarstwy współistnieją na całym obwodzie bieżni. Grubość warstwy mieści się w granicach: 213-342  $\mu\text{m}$ . Warstwa ma minimalną grubość w obszarze ściśle przylegania (bez delaminacji).

Warstwa materiału obcego naniesiona na bieżnię zewnętrzną łożyska B (rys. 12) różni się w znacznym stopniu łożyska A. Również można wyróżnić dwie podwarstwy, jednakże współistnieją ze sobą tylko w obszarze sąsiadującym z początkiem delaminacji. W środkowej części bieżni warstwa składa się ze startych elementów stalowych łożyska (zmierzona twardość wynosi  $809 \pm 18$  HV0,5) ponownie zahartowanych i utwardzonych zgmiotem. W stronę krawędzi bieżni zaczyna się pojawiać warstwa materiału obcego składająca się z mieszaniny materiałów (zmierzona twardość wynosi  $290 \pm 15$  HV0,5). Grubość materiału obcego mieści się w przedziale 105-196  $\mu\text{m}$ , co jest znacznie mniej w porównaniu do łożyska A. Warstwa o największej grubości mieści się środkowej części bieżni.

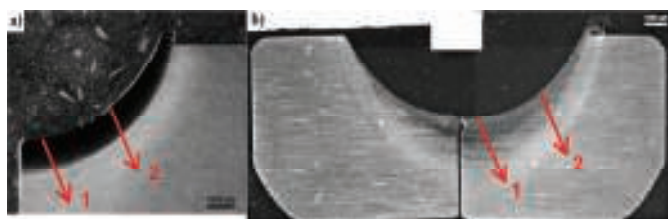
Trawienie szlifów próbek półpierścieni wewnętrznych w obydwu przypadkach ujawniło SDC. Inną cechą wspólną uszkodzeń półpierścieni jest obecność wypłytki przy krawędzi bieżni będącą efektem odkształcenia plastycznego bieżni. Na wypływkę widoczna jest również warstwa materiału obcego, będącego najprawdopodobniej mieszaniną stali i brązu z separatora. Mikrostruktury materiałów w SDC są zbliżone do zaprezentowanych na rys. 9b. W przypadku półpierścieni łożyska B nastąpiło ich trwałe połączenie przy krawędzi bieżni, które pękło w



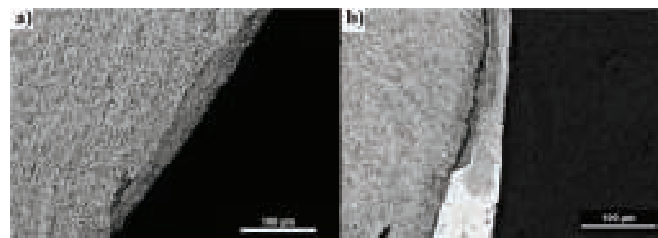
11. Mikrostruktura obszarów przy bieżni zewnętrznej łożyska A na podstawie rys. 10a: a) środek bieżni; b) dalsza część bieżni



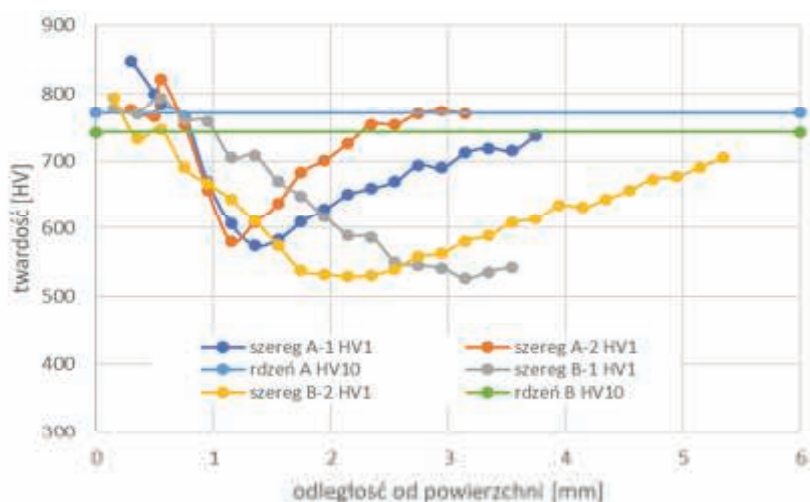
12. Mikrostruktura środkowej części bieżni zewnętrznej łożyska B, ze wskazaniem miejsca pomiaru twardości warstwy



13. Makroskopowe zdjęcie trawionego nitałem szlifu: a) półpięścienia wewnętrznej łożyska A; b) obu półpięścieni łożyska B



15. Mikrostruktura przekroju kulki (trawienie nitałem) przy krawędzi przekroju: a) łożyska A b) łożyska B



14. Wykres zależności twardości od odległości od powierzchni półpięścienia wewnętrznych łożysk A i B z uwzględnieniem twardości zmierzonych w rdzeniach próbek

czasie przecinania półpięścieni.

Głębokość SDC w półpięścieniach wewnętrznych również oszacowano na podstawie liniowych rozkładów twardości (rys. 14). Miejsca ich wykonania wskazano na rys. 13. Szeregi pomiarowe „1” były wykonane na wskroś przekroju poprzecznego próbek, co świadczy o przegrzaniu na wskroś obydwu półpięścieni, jednakże w przypadku łożyska A krzywa twardości dąży do wartości zmierzonej w rdzeniu ( $770 \pm 7$  HV10), natomiast zależność dla łożyska B jest w przybliżeniu malejąca na całym odcinku pomiarowym (twardość materiału w rdzeniu:  $742 \pm 20$  HV10). W szeregu pomiarowym „2” łożyska B również nastąpiło przegrzanie materiału na wskroś, w przypadku łożyska A głębokość SDC wynosi ok. 2,7 mm.

Mikrostruktury rdzeni kulek łożyska A i B odpowiadają mikrostrukturze przedstawionej na rys. 9b, natomiast mikrostruktury stref przypowierzchniowych przedstawiono na rys. 15. W obydwu przypadkach stwierdzono wtórne zahartowanie kulek na wskroś. Przy krawędziach przekrojów widoczne są wytarcia oraz materiał obcy, który uległ przyczepieniu do powierzchni kulek.

## Mechanizm powstawania uszkodzeń

Na podstawie przytoczonych powyżej wyników badań materiałowych można przedstawić następujący mechanizm zniszczenia obu łożysk w czasie wstrzymania dopływu oleju:

- ścieranie elementów stalowych łożysk, nawalcowywanie opiłków na współpracujące elementy, wzrost oporów ruchu oraz zwiększanie temperatury łożyska do temperatury austenitacji ( $900-1000$  °C);
- napieranie kulek na gniazda separatora podatnego na odkształcanie w wysokiej temperaturze, ścieranie gniazd, mieszanie opiłków brązu z opiłkami stalowymi;
- w przypadku łożyska B po zniszczeniu separatora nastąpiło zablokowanie łożyska oraz jego obracanie w tulejce tłumiącej.

Łożysko B uznano za bardziej zniszczone ze względu na większą powierzchnię SDC, zwłaszcza w pierścieniu zewnętrznym, połączenie obydwu półpięścieni wewnętrznych i bardziej zdeformowanych fragmentów separatora.

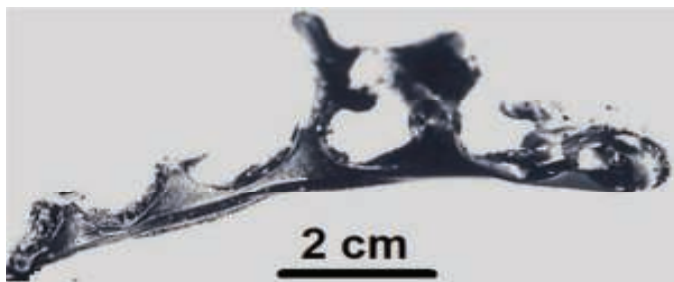
## Wcześniejsze badania

Przypadek łożyska z silnika lekkiego śmigłowca, w którym separator również uległ rozerwaniu, a przyczyną awarii było niedostateczne smarowanie łożyska stwierdzono w 1984 [5]. Jednakże separator w przeciwieństwie do wcześniej omawianych przypadków został rozerwany na więcej kawałków, z czego największy pokazano na rys. 16. Kulki zostały w znacznej mierze starte, półpięścień wewnętrzny zniekształcony, na parę trące naniósł materiał obcy pochodzący ze startych opiłków.

Obserwacje trawionych szlifów półpięścieni wewnętrznych (rys. 17) ujawniły obecność SDC (obszary nietrawiące się), znacznie większe od przypadków z lat 2016 i 2017. SDC w jednym półpięścieniu prawie całą próbkę, sam półpięścień jest wyraźnie zniekształcony i posiada wypływkę przy krawędzi bieżni. Obserwacje mikrostruktury półpięścienia w obszarze „I” (rys. 18a) oraz kulki (rys. 18b) ujawniły obecność mikropęknięć. Mikrostruktura bieżni zewnętrznej przypominała przedstawioną na rys. 11a. Twardości materiałów i ich mikrostruktury wykonane w miejscach niezniszczonych spełniały wymagania techniczne.

Znaczne odkształcenia półpięścieni, kulek, zniszczenie separatora oraz obecność mikropęknięć wewnątrz półpięścienia i kulki wskazują na zniszczenie łożyska w wysokiej temperaturze i przy znacznym wzroście obciążenia.

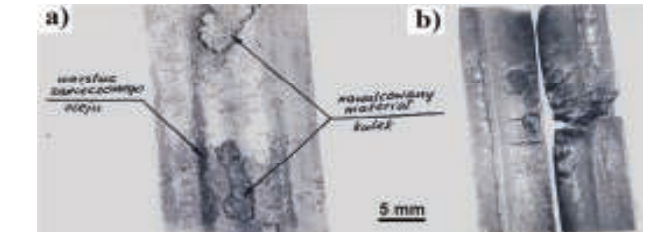
W historii badań omawianego typu łożysk prowadzonych w ITWL zdarzały się przypadki awarii, których cechą było uszkodzenie separatora bez jego fragmentacji. Zdarzenie tego typu zbadano w roku 1979 [6]. Uszkodzenie polegało na znaczącym odkształceniu i starciu kulek, naniesieniu na bieżnię zewnętrzną materiału kulek oraz zapie-



16. Elementy uszkodzonego łożyska badanego w 1984r. z zaznaczeniem miejsc pobierania próbek metalograficznych [5]



17. Szlify przekrojów poprzecznych próbek półpięścieni wewnętrznych trawione nitałem z zaznaczeniem miejsca obserwacji pod większym powiększeniem [5]



18. a) Mikrostruktura szlify przekroju w obszarze zaznaczonym na rys. 17; b) Mikrostruktura szlify przekroju kulki [5]

19. a) Powierzchnia bieżni zewnętrznej, b) Powierzchnia bieżni wewnętrznej [6]

kaniu na niej oleju (rys. 19a), deformacji plastycznej półpięścieni wewnętrznych (rys. 19b) i ich pękaniu. Separator nosił ślady wytarcia na wewnętrznej powierzchni centrującej.

Rys. 20 przedstawia makroskopowe zdjęcia szlifów przekrojów poprzecznych stalowych części łożyska. Szlify trawiono nitałem. Pierścień zewnętrzny wykazuje stosunkowo niewielką strefę degradacji termicznej (znacznie większe stwierdzono w przypadkach lat 2016 i 2017) z warstwą materiału kulek naniesioną w środkowej części bieżni. Szlify kulek oraz półpięścieni były odporne na czynnik trawiący, co świadczy o przegrzaniu tych elementów na wskroś. Ponadto na jednym z półpięścieni widoczna jest wypływka materiału przy krawędzi bieżni zbliżona do omawianych powyżej przypad-

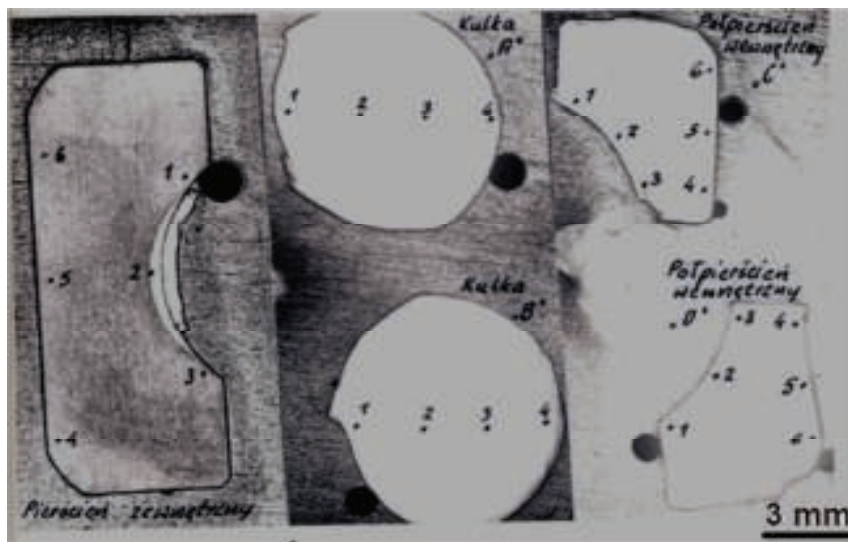
ków. Badania mikrostruktury oraz twardości pierścienia zewnętrznego poza SDC nie budzą zastrzeżeń. W przypadku półpięścieni wewnętrznych oraz kulek stwierdzono obecność struktury nieodpuszczonego martenzytu, a zatem powtórne zahartowanie materiałów. Ślad zapieczonego oleju na bieżni zewnętrznej świadczy o niewystarczającym dopływie oleju do łożyska

## Podsumowanie

Brak dopływu oleju do łożyska lub dostarczanie go w nieodpowiedniej ilości doprowadza do uszkodzania łożyska w sposób uzależniony od występujących temperatur, obciążeń mechanicznych oraz czasu działania niesprzyjających warunków. Omawiane przypadki awarii łożysk

różniły się stopniem ścierania elementów współpracujących z sobą, sposobem uszkodzenia separatora, strukturą oraz składem chemicznym warstw materiałów obcych nanoszonych na współpracujące z sobą elementy, strukturami i właściwościami materiałów. Cechami wspólnymi omawianych przypadków było przegrzewanie na wskroś elementów tocznych (ponowne hartowanie), przegrzewanie na wskroś przynajmniej części materiału półpięścienia wewnętrznego, odkształcanie plastyczne krawędzi jednego półpięścienia wewnętrznego w obszarze bieżni, nanoszenie materiału obcego na bieżnię pierścienia zewnętrznego. ◀

## Materiały źródłowe



20. Makroskopowe zdjęcia trawionych nitałem szlifów poprzecznych pierścienia zewnętrznego, kulek i półpięścieni wewnętrznych z zaznaczeniem miejsc pomiarów twardości [6]

- [1] H.K.D.H. Bhadeshia, Steels for bearings, Progress in Materials Science 57, 2012 268–435.
- [2] J. Lisiecki, Opracowanie ITWL – materiały niepublikowane, 1995.
- [3] A. Dudziński, K. Łęczycki, Opracowanie ITWL – materiały niepublikowane, 2016.
- [4] A. Dudziński, K. Łęczycki, Opracowanie ITWL – materiały niepublikowane, 2017.
- [5] H. Tomaszewski, Opracowanie ITWL – materiały niepublikowane, 1984.
- [6] A. Bonicki, Opracowanie ITWL – materiały niepublikowane, 1979.