

Marek IDZIOR<sup>1</sup>  
Maciej BIELIŃSKI<sup>2</sup>  
Tomasz BOROWCZYK<sup>3</sup>  
Paweł DASZKIEWICZ<sup>4</sup>  
Paweł STOBNICKI<sup>5</sup>

### **ANALIZA USZKODZEŃ TURBOSPREŻAREK SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM W RZECZYWISTYCH WARUNKACH EKSPLOATACJI**

*W artykule przedstawiono informacje na temat konstrukcji wybranej turbosprężarki Garrett model GT 1749V. Opisano i omówiono uszkodzenie oraz następstwa przedostania się na wirnik sprężarki ciała obcego. Bazowano na obserwacjach mikroskopowych o niewielkich powiększeniach (do 50x), wykonanych przy współpracy firmy zajmującej się regeneracją turbosprężarek.*

### **FAILURE ANALYSIS TURBOCHARGER OF DIESEL ENGINES IN REAL OPERATING CONDITIONS**

*The article presents information on the construction Garrett GT 1749V turbocharger. Describes and discusses the damage and the consequences of entering the compressor rotor of a foreign body. Based on the microscopic observations of small magnifications (up to 50x), made in cooperation with the firm remanufacturing of turbochargers.*

---

<sup>1</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, POLSKA, tel. (+48) 61 665-23-50, fax: (+48) 61 665-22-04, e-mail: marek.idzior@put.poznan.pl

<sup>2</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, POLSKA, tel. (+48) 61 647-58-62, fax: (+48) 61 665-22-04, e-mail: maciej.bielinski@o2.pl

<sup>3</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, POLSKA, tel. (+48) 61 647-58-62, fax: (+48) 61 665-22-04, e-mail: tomasz.borowczyk@doctorate.put.poznan.pl

<sup>4</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, POLSKA, tel. (+48) 61 647-58-62, fax: (+48) 61 665-22-04, e-mail: pawel.daszkievicz@doctorate.put.poznan.pl

<sup>5</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, POLSKA, tel. (+48) 61 665-20-49, fax: (+48) 61 665-22-04, e-mail: pawel.stobnicki@doctorate.put.poznan.pl

## 1. WSTĘP

Obiektem badań była turbosprężarka firmy Garrett model GT 1749V. Montowana jest seryjnie m.in. do silnika o pojemności 1900 cm<sup>3</sup> z zapłonem samoczynnym o mocy znamionowej 88 kW, wykorzystywanego do napędu samochodu osobowego.

Artykuł napisano w celu zwrócenia uwagi, że istnieje ścisły związek przyczynowo – skutkowy między niewielkim defektem jednego z elementów turbosprężarki, a całkowitym zniszczeniem zespołu.

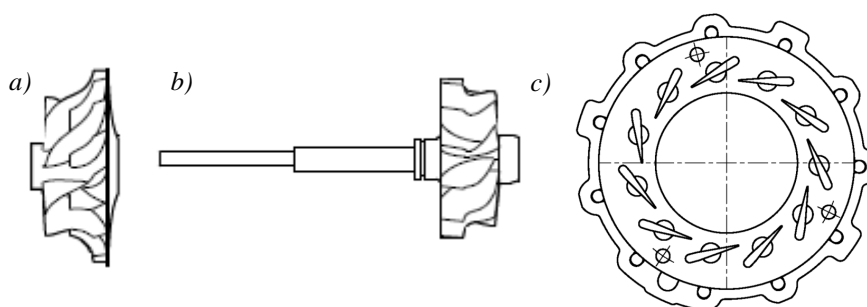
## 2. CHARAKTERYSTYKA KONSTRUKCYJNA TURBOSPŘĘŻARKI GARRETT 1749V

### 2.1 Wstęp

Przedstawiony ogólny opis konstrukcji zawiera dokładniejszy opis konstrukcji ułożyskowania, natomiast pominięto w nim charakterystykę konstrukcyjną wirnika turbiny i sprężarki oraz szczegółowy opis budowy pozostałych podzespołów.

### 2.2 Opis konstrukcji

Opisywana turbosprężarka zbudowana jest wg współcześnie obowiązujących standardów w tego typu konstrukcjach. W skład turbosprężarki wchodzi część sprężarkowa, część turbinowa oraz korpus środkowy. Sprężanie powietrza odbywa się w sprężarce przepływowej, odśrodkowej (osiowo promieniowej) o łopatkach zwichrowanych. Wirnik sprężarki wykonany jest ze stopu aluminium. Rozprężanie spalin zachodzi w turbinie dośrodkowej (promieniowo – osiowej). Wirnik turbiny wykonany ze stali wysokostopowej, połączony jest na stałe z wałem turbosprężarki. Wirnik sprężarki oraz turbiny wraz z wałem, przedstawiono na rys.2.1.



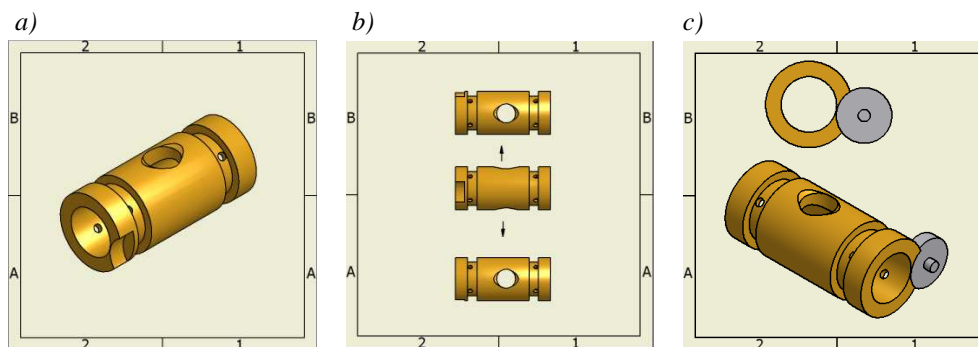
Rys.2.1. Wybrane elementy turbosprężarki Garrett 1749V: a) wirnik sprężarki, b) wał z wirnikiem turbiny, c) zespół łopatek wieńca kierownicy [6]

Regulacja mocy turbiny (tym samym wydatku sprężarki) odbywa się za pomocą zmiany kąta nachylenia łopatek wieńca kierującego. Każda z 11 łopatek zamocowana

jest w korpusie wieńca w taki sposób, że możliwy jest jej obrót wokół osi pionowej. Każda łopatką wieńca posiada dźwignię, która współpracuje z ruchomym pierścieniem, umieszczonym na obwodzie. Obrót pierścienia powoduje kątowe przestawienie wszystkich łopatek, co wpływa na zmianę kąta napływu spalin na wirnik turbiny. Sterowanie ruchem pierścienia odbywa się przy pomocy siłownika pneumatycznego uruchamianego podciśnieniem. Rys.2.1c. przedstawia widok wieńca kierującego (od strony napływu spalin) wraz z pierścieniem. Zespół wieńca kierującego zmontowany jest z żeliwnym korpusem turbiny.

Wał turbosprężarki łożyskowy jest za pomocą łożysk ślizgowych: łożyska poprzecznego oraz łożyska wzdłużnego tzw. oporowego. Medium smarującym łożyska jest olej doprowadzany do turbosprężarki z magistrali silnika.

Łożysko poprzeczne przenosi siły promieniowe pochodzące od reakcji gazów spalinowych na wirnik turbiny oraz reakcji zasysanego powietrza na wirnik sprężarki. Panew łożyska poprzecznego (rys.2.2a.) stanowi tulejka łożyskowa wykonana ze stopu brązu, współpracująca z czopami wału turbosprężarki. Olej do łożyska doprowadzany jest dwupunktowo, kanałami drążonymi wewnątrz korpusu. Do strefy kontaktu panewki łożyska z czopem olej jest dostarczany poprzez otworki umieszczone na obwodzie tulei. Dwa rowki wykonane na obwodzie panewki powodują, że gromadzący się w nich olej zapewnia ciągłość filmu olejowego w łożysku. Z panewki olej wydostaje dwoma otworami (rys.2.2b.): otworem górnym i dolnym. Olej wypływający otworem dolnym spływa bezpośrednio do objętości w korpusie turbosprężarki, w której gromadzi się, otworem górnym natomiast olej spływa po powierzchni zewnętrznej tulei dodatkowo odbierając ciepło od jej ścianek. Panewka zabezpieczona jest przed obrotem klinem, o przekroju okrągłym, którego oś zamocowana jest w korpusie środkowym (rys.2.2c.).

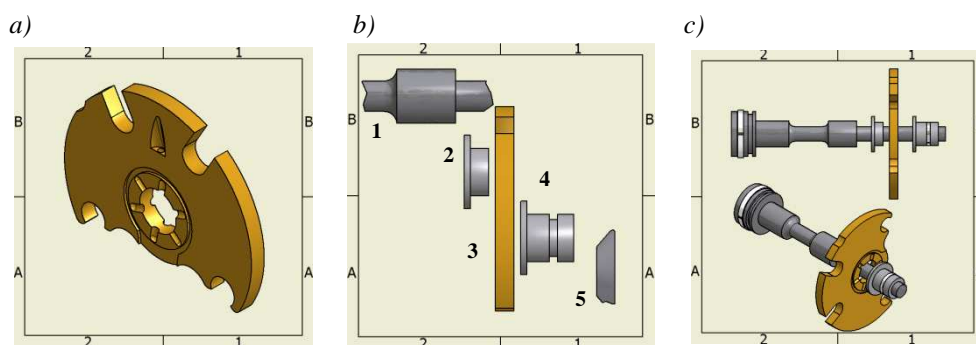


Rys.2.2. Panew poprzecznego łożyska ślizgowego: a) widok ogólny, b) górny i dolny otwór spływowy oleju, c) sposób ustalenia pozycji panewki łożyska względem korpusu

Łożysko ślizgowe wzdłużne zbudowane jest z tarczy wykonanej ze stopu brązu (rys.2.3a.), obustronnie współpracujące ze stalowymi trzpieniami, które obracają się wraz z wirnikiem. Olej do strefy tarcia doprowadzany jest drążonym otworem wewnątrz tarczy łożyska, odpływa natomiast kanałem utworzonym przez wybranie na powierzchni. Trzpienie łożyska dociskane są do tarczy wypadkową siłą osiową pochodzącą

od rozprężanych na turbinie gazów spalinowych oraz sprężanego w sprężarce powietrza. Siłę osiową po stronie turbiny przekazuje na trzpień powierzchnia czołowa czopa wału, natomiast ze strony sprężarki powierzchnia walcowa wirnika sprężarki. O tym, który trzpień przenosi obciążenie na powierzchnię tarczy łożyska decyduje wypadkowa siła: składowej osiowej po stronie turbiny i sprężarki. Podczas ustalonej prędkości obrotowej wirnika i podczas przyspieszania siła wypadkowa jest większa po stronie turbiny, natomiast podczas zwalniania, po stronie sprężarki.

Uszczelnienie wirnika turbosprężarki uzyskane jest przez dwa pierścienie uszczelniające. Od strony turbiny pierścień osadzony jest w rowku na wale (zapewniona jest możliwość obrotu) i w korpusie środkowym (osadzony na stałe). Poza pierścieniem, na wałku od strony turbiny wykonane jest jednoczęściowe uszczelnienie labiryntowe. Od strony sprężarki uszczelnienie stanowi pierścień osadzony w rowku wykonanym w trzpieniu łożyska wzdłużnego (osadzony obrotowo) i w dolnej części korpusu sprężarki (na stałe). Poszczególne elementy łożyskowania wzdłużnego turbosprężarki przedstawiono na (rys.2.3b.), złożenie wraz z fragmentem wału wirnika oraz zamocowanymi uszczelnieniami przedstawiono na (rys.2.3c.).

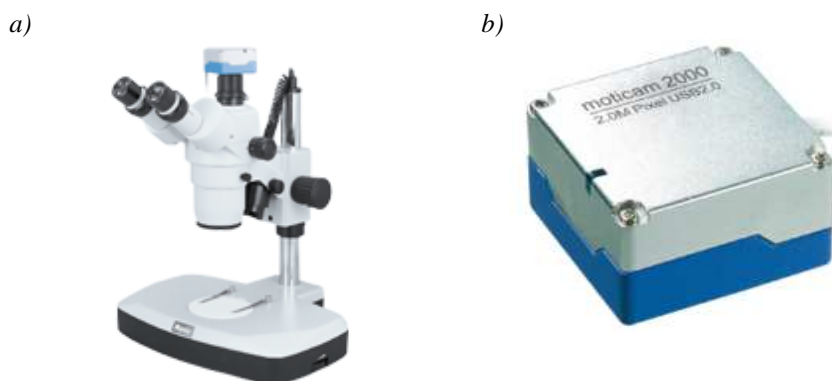


Rys.2.3. Wzdłużne łożysko ślizgowe: a) tarcza łożyska, b) elementy łożyska: 1-czop wału, 2-trzpień łożyska od strony turbiny, 3-tarcza łożyska, 4-trzpień po stronie sprężarki, 5-walcowa część wirnika sprężarki, c) widok zmontowanego zespołu łożyska

### 3. OPIS USZKODZEŃ TURBOSPŘĘŻARKI W WYNIKU PRZEDOSTANIA SIĘ CIAŁA OBCEGO NA WIRNIK SPŘĘŻARKI

#### 3.1. Stanowisko badawcze i metodyka badań

Badania przeprowadzono w zakładzie zajmującym się regeneracją i naprawą układów doładowania silników spalinowych. Analizie poddano turbosprężarkę firmy GARRETT model 1749V. Obserwację prowadzono za pomocą mikroskopu MOTIC SMZ-168 (rys.3.1a.) wyposażonego w kamerę firmy MOTIC MOTICAM 2000 (rys.3.1b.) oraz cyfrowego aparatu fotograficznego OLYMPUS uTOUGH-8010. Do obróbki zdjęć wykorzystano program Helicon Focus, który tworzy jeden całkowicie ostry obraz z szeregu widoków częściowo ostrych, przez wyodrębnienie i połączenie obszarów o największej ostrości.



Rys.3.1. Aparatura badawcza a) mikroskop stereoskopowy MOTIC SMZ 168, b) kamera cyfrowa MOTICAM 2000 [7]

### 3.2. Przyczyna uszkodzenia

Uszkodzenie tego typu powstaje w następstwie przedostania się jednego lub kilku ciał obcych do układu dolotowego. Pod pojęciem ciała obcego obecne w układzie dolotowym rozumie się: niewielkich rozmiarów zanieczyszczenie przepuszczone przez filtra powietrza (niewłaściwy montaż, zużycie, niedopasowany filtr) lub przez nieszczelność w układzie, wykruszone fragmenty króćców i łączników, elementy pozostawione w obrębie kanału dolotowego po montażu lub naprawie (podkładki, nakrętki). Bezpośrednimi skutkami przedostania się ciała obcego w przestrzeń pracy wirnika jest zniekształcenie jego geometrii. Mechanizm powstawania uszkodzenia jest erozyjny i zależy od wielkości ciała trafiającego na łopatki wirnika. Nawet najmniejszy element wprowadzany wraz ze strumieniem powietrza na koło wirnikowe, w wyniku znacznej energii strumienia gazu i sił bezwładności, silnie oddziałuje z łopatkami.

### 3.3. Opis uszkodzeń

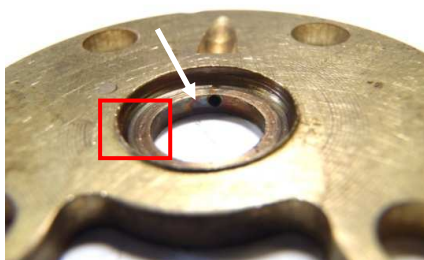
Ciałem obcym, które zainicjowało proces niszczenia analizowanej turbosprężarki, najprawdopodobniej był element mocujący niewielkich rozmiarów (podkładka, pierścień osadczy). Świadczy o tym typ deformacji łopatek wirnika sprężarki. Część łopatek jest częściowo wyłamana lub silnie zakrzywiona.



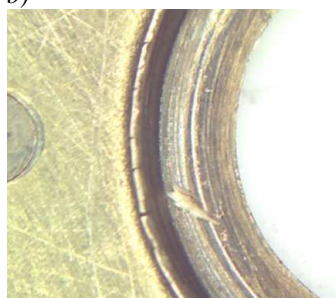
Rys.3.2. Uszkodzony wirnik sprężarki

Dalsza eksploatacja uszkodzonej w ten sposób turbosprężarki generuje dalsze zniszczenia prowadząc do całkowitej dysfunkcji. Zmiana parametrów geometrycznych wirnika sprężarki powoduje niewyważenie, które polega na niezgodności osi symetrii z główną osią bezwładności układu turbina – wał – sprężarka, a to w następstwie powoduje uszkodzenia o charakterze lawinowym. Charakter postępowania zniszczeń nie jest jednoznaczny. Z jednej strony wynikać może, z pojawiających się nieszczelności układu smarowania turbosprężarki w wyniku zniszczenia pierścieni uszczelniających. W takiej sytuacji olej w niewystarczającej ilości dociera do łożysk doprowadzając do patologicznej pracy tych elementów – tarcie płynne między elementami łożysk zastąpione zostaje przez tarcie mieszane lub suche. Rosnąca temperatura w styku i wywiązywana duża ilość ciepła, doprowadza do zużycia cieplnego elementów. Zużycie cieplne polega na odkształcaniu warstwy wierzchniej, odsłanianiu czystych powierzchni metalu i ich zbliżeniu na odległość działania sił międzyatomowych. Staje się to przyczyną szepiania i uszkodzenia powierzchni przez wrywanie z niej cząstek i ich rozmazywanie na przeciwpowierzchni [2]. Z drugiej strony cechą niewyważonego wirnika jest wzrost amplitudy drgań, która doprowadza do tego, że olej jest wyciskany z łożysk, przez oscylacyjnie pracujące elementy. Wzrost amplitudy drgań doprowadza również do możliwości wystąpienia zjawiska rezonansu, które wzmaga proces niszczenia.

a)



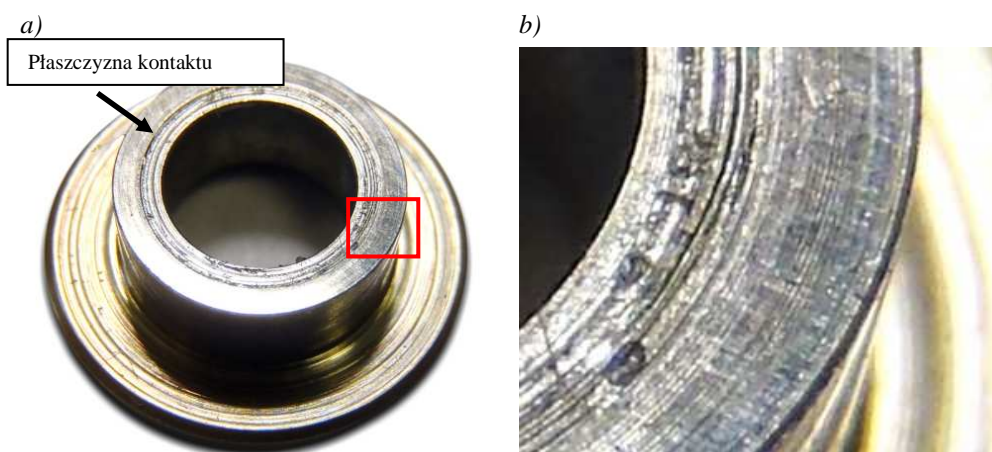
b)



Rys.3.3. Uszkodzone gniazdo łożyska wzdłużnego a) skala 1:1, b) skala 10:1

Bez względu na to czy brak oleju w łożyskach wynika z wycieku oleju przez nieszczelności, czy przez wypompowanie go ze strefy kontaktu dochodzi do bezpośredniego styku trzpieni z tarczą w łożysku wzdłużnym lub czopa wału z panewką w łożysku poprzecznym. Efekt naprężeń cieplnych zaobserwować można w miejscu współpracy trzpienia z tarczą łożyska wzdłużnego. Bezpośredni kontakt trzpienia z tarczą doprowadził do nadtopienia jej powierzchni i ubytku materiału 1,5 mm w głąb (rys.3.3.). Obecność naprężeń cieplnych potwierdza także przebarwienie materiału tarczy. Charakter postępowania zniszczeń intensyfikowany jest również przez niekorzystne warunki pracy turbosprężarki (szczególnie przez wysoką temperaturę gazów spalinowych)

Efekt zużywania cieplnego zaobserwować można także na powierzchni trzpienia łożyska wzdłużnego (rys.3.4.). W normalnych warunkach powierzchnia ta współpracuje z tarczą za pośrednictwem filmu olejowego. Jednak w wyniku patologicznych zjawisk w obrębie łożyska (nadtopienie, ubytek materiału tarczy etc.) dochodzi do skojarzenia dwóch trzpieni. Skojarzenie dwóch jednoimiennych, twardych materiałów nieoddzielonych warstwą oleju doprowadza do zużywania cieplnego powierzchni. Pojawiają się miejscowe szczepienia warstw wierzchnich materiału co doprowadza do zniekształcenia i ubytków na powierzchni w skutek wyrywania.

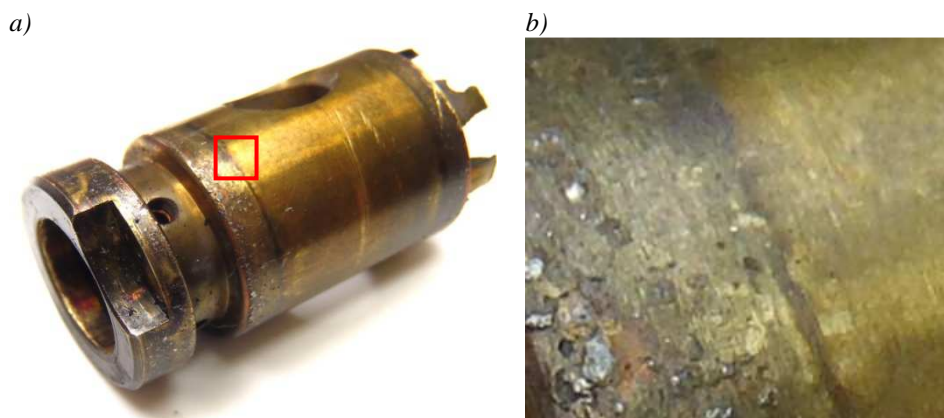


Rys.3.4. Uszkodzony trzpień łożyska wzdłużnego a) skala 3:1, b) skala 30:1

Zjawiska niszczące będące następstwem niewyważonego wirnika obserwowane są także w obrębie zewnętrznej powierzchni tulei łożyska ślizgowego. W miejscu styku tulei z korpusem środkowym turbosprężarki doszło do zjawiska frettingu. Tego typu proces zużywania zachodzi w nominalnie spoczynkowych złączach, a wywołany jest mikroprzemieszczeniami względnymi połączonych elementów. Mikroprzemieszczenia (kilka mikrometrów) wynikają z drgań danego zespołu. Niszczący mechanizm tego procesu polega na jednoczesnym oddziaływaniu adhezyjnym, szczepianiu oraz intensywnym utlenianiu.

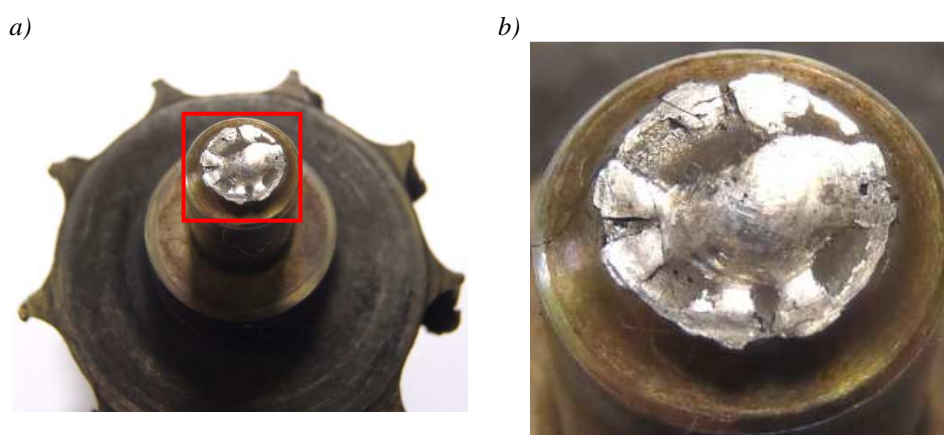
To intensywne utlenianie powodowane jest zwiększoną aktywnością warstwy wierzchniej

w skutek naprężeń stykowych i odkształceń [2]. Efekt frettingu na powierzchni tulei łożyska przedstawiono na rys.3.5., co potwierdza drganie zespołu sprężarka – wał – turbina.



Rys.3.5. Uszkodzone łożysko poprzeczne a) skala 1:1, b) skala 10:1

Najbardziej widocznym efektem procesu niszczenia turbosprężarki było zerwanie wału. Doszło do tego m.in. na skutek zwiększającej się amplitudy drgań wału, wspomnianego zjawiska rezonansu, bądź wzrostu naprężeń zmęczeniowych. Wał przełamał się w miejscu współpracy z łożyskiem poprzecznym, w miejscu zmiany przekroju (wpływ karbu). Na rys.3.6. przedstawiono powierzchnię przełomu wału. Widoczne są zmęczeniowe przemieszczenia względne materiału. Ponadto płaszczyzna przełomu jest wypolerowana, co świadczy, że dochodziło do kontaktu zerwanych części wału. Wnioskować można, że obracała się część wału z wirnikiem turbiny, natomiast część połączona ze sprężarką pozostawała nieruchoma. W takim stanie nie było możliwe doładowanie silnika.



Rys.3.6. Przełom wału a) skala 1:1, b) skala 4:1

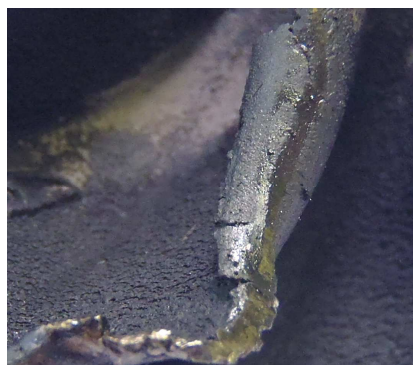


Zerwanie wału pociągnęło za sobą kolejne zniszczenia w postaci deformacji łopatek wirnika turbiny (rys.3.7.). Wygięcie nastąpiło w wyniku zderzenia łopatek z korpusem turbiny. Zniekształcenia w obrębie łopatki turbiny, przedstawione na rys.3.7b., świadczą o zmianie właściwości fizycznych materiału na skutek zbyt wysokiej temperatury (powyżej przemiany eutektycznej w stali). Wzrost temperatury spowodowany był tarciami łopatek o korpus turbiny w obecności gorących gazów spalinowych.

a)



b)



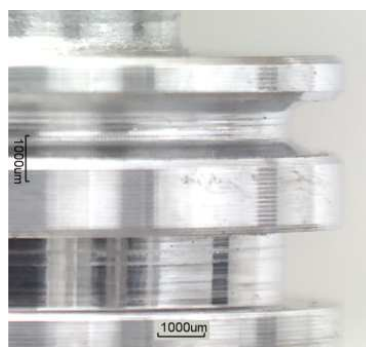
Rys.3.7. Zdeformowane łopatki turbiny a) skala 1:1, b) skala 4:1

W części urwanego wału po stronie turbiny, oprócz zniekształconych łopatek zaobserwowano rozległe wytarcie powierzchni pierścieniowej (rys.3.8.). Fakt ten potwierdza, że mimo rozerwania wału, na wirnik turbiny w dalszym ciągu trafiały gazy spalinowe.

a)

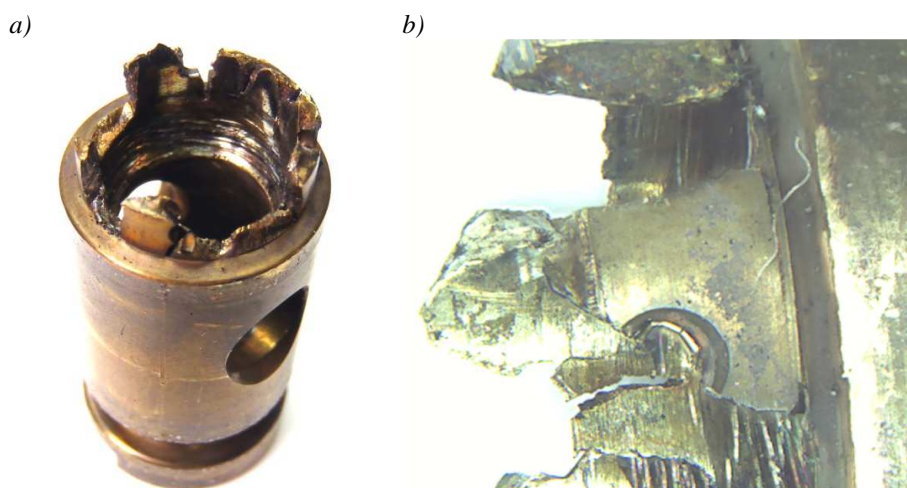


b)



Rys.3.8. Część pierścieniowa a) element uszkodzony - skala 1:1, b) element nowy - skala 4:1

Zjawisko to widoczne jest także na części tulei łożyska ślizgowego, która współpracowała z zerwanym wałem (rys.3.9.). Zaobserwować można wyszczerbienie tulei w obszarze kontaktu z wałem.



Rys.3.9. Uszkodzone łożysko poprzeczne a) skala 2:1, b) skala 10:1

#### 4. ZAKOŃCZENIE

Przedostanie się ciała obcego na wirnik sprężarki powoduje uszkodzenie jego łopatek. Przy tego typu zjawisku, proces zużywania turbosprężarki zachodzi bardzo gwałtownie. Obserwuje się brak stanów przejściowych procesu zużywania, destrukcja następuje w sposób lawinowy. Zniszczeniu ulega m.in. łożyskowanie, wał, wirnik sprężarki i turbiny. Pojawiają się nieszczelności w układzie smarowania turbosprężarki, a w następstwie występują wycieki oleju. Zjawisko to jest niepożądane z wielu względów, przede wszystkim zagraża rozbieganiu się silnika.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Chmielniak T.: *Maszyny przepływowe*, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 1997
- [2] Lawrowski Z.: *Tribologia. Tarcie, zużywanie i smarowanie*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2008
- [3] Turbocharger Technician's Guide, Detroit/Michigan, Detroit Diesel Corporation 1994
- [4] Witkowski A.: *Sprężarki wirnikowe. Teoria, konstrukcja, eksploatacja*, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2004
- [5] Materiały zebrane z praktyki rzeczoznawczej autorów
- [6] [www.melett.com/turbo\\_parts\\_catalogue](http://www.melett.com/turbo_parts_catalogue) 03.2011
- [7] [www.mikronet.com/imaging/motic-moticams.shtml](http://www.mikronet.com/imaging/motic-moticams.shtml) 03.2011