



Article citation info:

Warczek, J., Juzuń, M. Application of visual test methods loaded elements of rotating machinery flow to assess their condition. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2016, **90**, 195-208. ISSN: 0209-3324. DOI: 10.20858/sjsutst.2016.90.17.

Jan WARCZEK¹, Mateusz JUZUŃ²

APPLICATION OF VISUAL TEST METHODS LOADED ELEMENTS OF ROTATING MACHINERY FLOW TO ASSESS THEIR CONDITION

Summary. The article presents the aims and objectives of the process of non-destructive testing of turbine aircraft engines using visual methods indirect use of endoscopy. Presents brief characteristics of the construction of engines tested, analyzed the diagnostic procedures used in non-destructive testing methods are shown diagnostic equipment used in research. The paper presents examples of the results of diagnostic checks obtained for the test aircraft engine.

Keywords: non-destructive tests, aircraft engine diagnostic, condition of aircraft engine assess

ZASTOSOWANIE WIZYJNYCH METOD BADAŃ OBCIĄŻONYCH ELEMENTÓW WIRNIKOWYCH MASZYN PRZEPLYWOWYCH DO OCENY ICH STANU TECHNICZNEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono cele i założenia procesu badań nieniszczących lotniczych silników turbinowych przy użyciu metod wizualnych pośrednich, z wykorzystaniem endoskopii. Przedstawiono krótkie charakterystyki budowy badanych silników, przeanalizowano procedury diagnostyczne,

¹ Faculty of Transport, Silesian University of Technology, Krasińskiego 8 Street, 40-019 Katowice, Poland.
E-mail: jan.warczek@polsl.pl.

² Faculty of Transport, Silesian University of Technology, Krasińskiego 8 Street, 40-019 Katowice, Poland.
E-mail: m.juzun@gmail.com.

wykorzystywane w metodach badań nieniszczących, przedstawiono sprzęt diagnostyczny wykorzystany w badaniach. W artykule przedstawiono przykładowe wyniki sprawdzeń diagnostycznych, uzyskane dla badanego silnika lotniczego.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, diagnostyka silników lotniczych, oszacowanie stanu technicznego silnika lotniczego

1. WSTĘP

Lotnicze silniki turbinowe, w całym okresie eksploatacji, poddane są bardzo dużym obciążeniom mechanicznym i cieplnym, które zmieniają się w funkcji czasu. Wynika stąd konieczność ciągłego monitorowania stanu technicznego jednostki napędowej, co pozwala na wczesne wykrycie niesprawności oraz prognozowanie stanu technicznego na kolejne godziny pracy.

Ze względu na budowę elementów składowych oraz sposób wykorzystania energii paliwa silniki wirnikowe przepływowe można podzielić na:

- turbodozrutowe (jednoprzepływowe, dwuprzepływowe, wentylatorowe),
- turbowałowe (np. turbośmigłowe).

Podstawowe elementy konstrukcyjne takich maszyn, podlegające największym obciążeniom termicznym i mechanicznym przedstawia rys. 1.

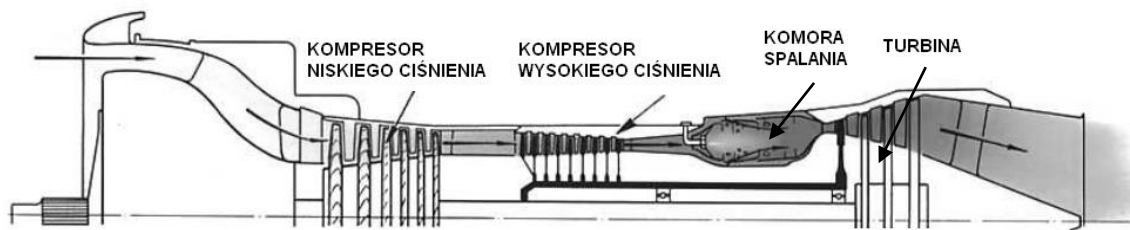
W turbinie gazowej powietrze zostaje sprężone za pomocą jednego z dwóch typów sprężarek, w zależności od konstrukcji jednostki napędowej. Moment obrotowy niezbędny do sprężenia powietrza doprowadzany jest do sprężarki z turbiny za pomocą wału. W przypadku sprężarki o konstrukcji odśrodkowej, ruch powietrza powoduje wzrost ciśnienia oraz powstanie energii kinetycznej. W celu przemiany tej energii na ciśnienie, konieczne jest zastosowanie układu dyfuzora i spirali. Powietrze do sprężarki zasysane jest centralnie, następnie przepływa przez sprężarkę odśrodkową na zewnątrz, pod kątem 90° w stosunku do kierunku lotu, a następnie jest skierowane w stronę komory spalania [1, 2].



Rys. 1. Silnik turbodozrutowy wyposażony w dwustopniową sprężarkę odśrodkową [1]

Sprężarki osiowe natomiast zbudowane są z naprzemiennie umieszczonych wirników łopatek, które mają za zadanie przyspieszyć przepływ powietrza oraz łopatek nieruchomych (kierownic), które hamując przepływ powietrza zwiększają jego ciśnienie.

Do największych zalet sprężarek osiowych należy ich wysoka sprawność przy nominalnych obrotach, i korzystne parametry pracy, przy dużych prędkościach.



Rys. 1. Silnik turbodoładowany wyposażony w wielostopniową sprężarkę osiową [1]

Kolejnym zasadniczym elementem konstrukcji silnika turbinowego jest komora spalania. Do zadań komory spalania należy przekształcenie energii chemicznej paliwa na ciepło i energię mechaniczną gazów spalinowych, które stanowią składnik czynnika roboczego, zasilającego turbinę [1, 5, 9]. Zadaniem komory spalania jest spalanie paliwa, podawanego przez wtryskiwacze w obecności powietrza dostarczanego w dużych ilościach przez sprężarkę. Otrzymane ciepło wpływa na gwałtowne rozszerzenie strumienia gazu, który w wyniku otrzymanego przyspieszenia zwiększa prędkość i w postaci jednorodnego strumienia trafia na łopatki turbiny. Jednocześnie, strumień tłoczonego powietrza nie może spowodować zgaszenia płomienia, który w każdym cyklu pracy musi być stabilny. W tym celu stosowane są dodatkowe elementy konstrukcyjne, takie jak rury ogniowe, zawrotywy powietrza i stateczniki płomienia [9].

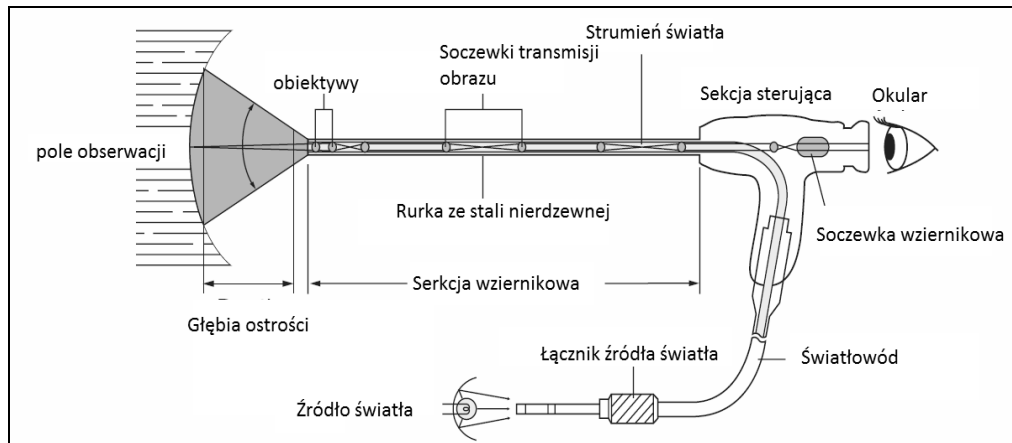
Zadaniem turbiny w silniku jest przechwycenie energii gorących gazów wydostających się z komory spalania. Upraszczając, przeważnie turbiny podzielone są na 2 stopnie. Pierwszy z nich, nazwany turbiną wysokiego ciśnienia, połączony jest wspólnym wałem ze sprężarką, natomiast drugi stopień, zwany turbiną niskiego ciśnienia, napędza wał napędowy, który przekazuje napęd na osprzęt silnika (w silnikach turbodoładowanych również na napęd śmigła). [11] W przypadku silników odrzutowych nie występuje napęd wału z turbiny (wyjątkiem jest napęd agregatów), natomiast energia gazów spalinowych, które minęły turbinę, uchodzi przez dyszę silnika i tworząc zjawisko odrzutu, napędza statek powietrzny.

2. METODY DIAGNOSTYKI

W ostatnich latach opracowano i rozwinięto różne metody badań nieniszczących, które nie wymagają demontażu silnika w celu oceny stanu technicznego jego istotnych podzespołów. Szczególne miejsce w grupie metod badań nieniszczących zajmują metody wizyjne, które ze względu na rodzaj stosowanych układów można podzielić na:

- metody boroskopowe,
- metody fiberoskopowe,
- metody z wykorzystaniem mikrokamery (wideoendoskop).

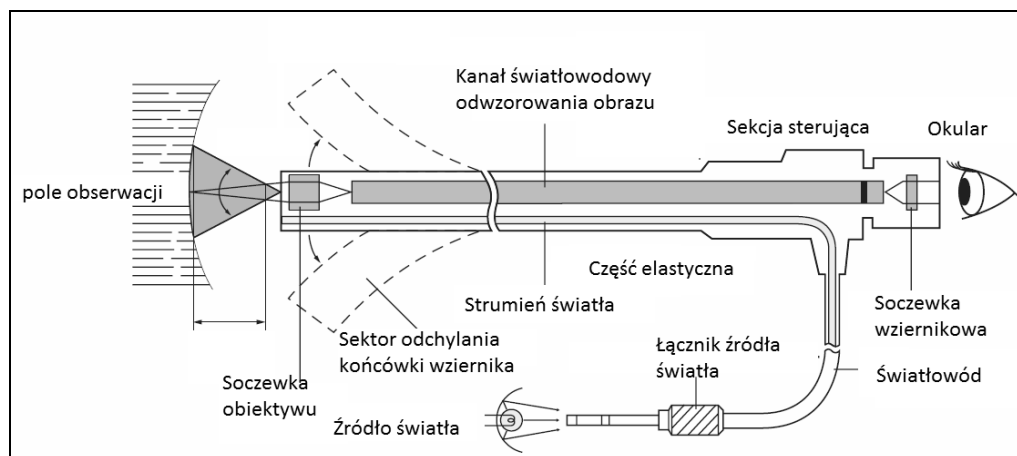
W metodzie boroskopowej, której schemat został przedstawiony na rys. 3, transmisja zimnego strumienia światła do okna sondy w pobliżu obiektywu boroskopu jest realizowana za pośrednictwem oddzielnego światłowodu z zewnętrznego oświetlacza, który wyposażony jest w żarówkę halogenową lub ksenonową. Wadą tej metody jest sztywna sekcja wziernikowa, która w wielu praktycznych zastosowaniach utrudnia przeprowadzenie inspekcji wizyjnej.



Rys. 3. Konstrukcja boroskopu [3]

W miarę rozwoju technologii światłowodowej, możliwe stało się skonstruowanie urządzenia zwanego fiberoskopem, czyli elastycznym wzornikiem, który składa się z wiązki kilkudziesięciu tysięcy cienkich włókien szklanych transmitujących optyczny obraz badanego obiektu do obserwatora oraz przewodzących zimny strumień świetlny badanego obiektu od zewnętrznego źródła światła. Ponieważ każde z włókien szklanych transmituje obraz obiektu o innej barwie i jasności, więc ma on tyle punktów, ile pojedynczych włókien szklanych zawiera kompletna wiązka światłowodowa. Rozdzielczość obserwowanego obrazu odpowiada więc liczbie włókien w wiązce [4, 5, 8].

Obecnie, coraz częściej system przenoszenia obrazu z obiektywu do odbiorcy jest realizowany za pomocą elektrycznego sygnału, którego źródłem jest mikrokamera umieszczona w głowicy pomiarowej. Takie rozwiązanie pozwala na łatwe przetwarzanie uzyskanych obrazów i praktycznie nieograniczony zasięg przewodu pomiarowego. Dodatkową zaletą jest trwałość połączona z niezawodnością urządzenia.



Rys. 4. Konstrukcja fiberoskopu [3]

3. METODY OCENY WYNIKÓW BADAŃ ENDOSKOPOWYCH

Podczas obserwacji wewnętrznych powierzchni maszyny powstaje problem polegający na braku odniesienia do wzorców, które umożliwiłyby określenie wymiarów napotkanych defektów. Rozmiar obserwowanego obiektu jest nie tylko uzależniony od rzeczywistego rozmiaru, lecz również zależy od odległości obiektywu sondy wzornikowej od badanej

powierzchni. Rozpoznanie rozmiaru defektu jest kluczowe z punktu widzenia prawidłowo przeprowadzonego badania diagnostycznego, ponieważ każdy producent określa dopuszczalne rozmiary defektów, które mogą wystąpić w urządzeniu. W tradycyjnym, optycznym podejściu do tego zagadnienia zastosowanie znajduje metoda porównawcza, w której wykorzystuje się kalibrowane kształty pomiarowe nakładane na końcówkę sondy wzornikowej.

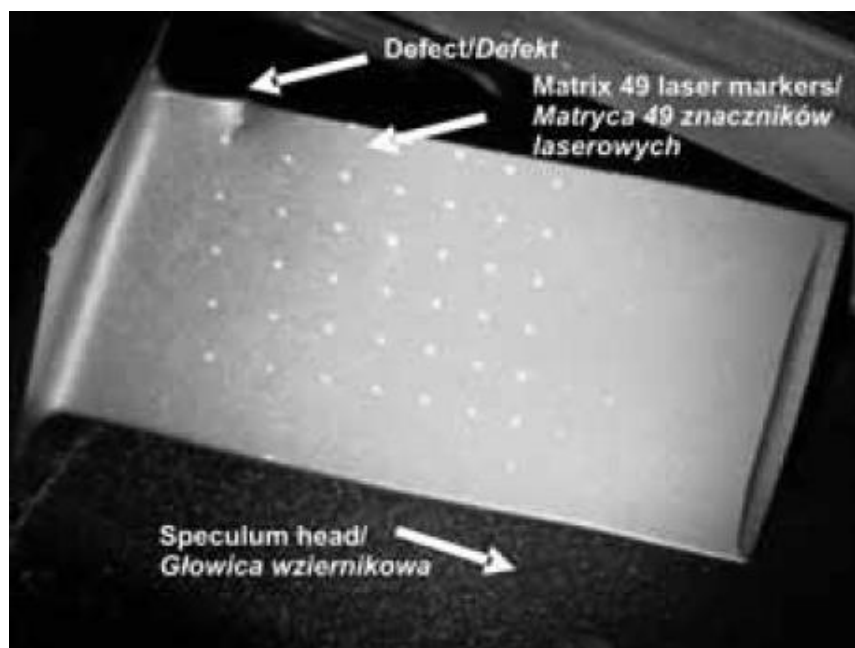
W endoskopii cyfrowej wykorzystuje się analizatory obrazu, współpracujące z głowicami pomiarowymi, wykorzystujące metody stereo, cienia lub laserową do określenia odległości obiektywu sondy wzornikowej od obserwowanej powierzchni i dalej rozmiarów wykrywanych defektów powierzchniowych.

Głowice pomiarowe tych urządzeń umożliwiają zwymiarowanie widzianych obrazów w taki sposób, aby dawały wrażenie poziomej trójwymiarowości z ich głębią, bryłowatością i wzajemnym rozmieszczeniem [5].

Obecnie najczęściej stosowane metody oceny zmian powierzchni części przepływowych maszyn wirnikowych to metody laserowe. Występują ich dwie odmiany:

- znacznikowa,
- skaningowa.

W metodzie znacznikowej wykorzystuje się zasadę pomiaru wielopunktowego, polegającego na określeniu odległości głowicy wzornikowej urządzenia wideoskopowego od obserwowanej powierzchni, na podstawie powierzchni bazowej. Powierzchnia bazowa jest definiowana za pomocą co najmniej trzech, najbardziej dopasowanych z 49 punktów laserowych matrycy znaczników, które są wyświetlane na obserwowanym elemencie z rozpraszającego układu optycznego sondy (rys. 5).



Rys. 5. Widok łopatki turbinowej po nałożeniu siatki laserowej matrycy [6]

Im większa jest odległość od badanej powierzchni, tym mniejsze jest przemieszczenie znaczników w lewą stronę ekranu. Kolejny etap realizacji pomiaru, rejestrowany jest jako obraz powierzchni, a następnie przy użyciu metody triangulacji, wyznaczane są rozmiary wykrytego defektu [5].

Drugą metodą wykorzystania laserowych promieni do pomiarów rozmiaru defektów jest metoda skaningowa. Układ optyczny skanera laserowego dokonuje rozproszenia wiązki

promienia laserowego w układzie wirujących zwierciadeł. Wiązka laserowa, która została rozproszona, pada na badaną powierzchnię i ulega odbiciu, które to kierowane jest na soczewkę skupiającą i detektor pomiarowy. Ilość światła laserowego, które zostanie odbite, uzależnione jest od stanu powierzchni. W przypadku gdy promień laserowy przesunie się nad defektem powierzchniowym, nastąpi pochłonięcie, wynikające z ograniczonej ilości odbitego światła. Skutkiem tego natężenie światła odbitego jest niższe niż w przypadku powierzchni, która jest wolna od uszkodzeń. Dokonanie oceny wymiaru defektów następuje na podstawie analizy spektralnej wiązki lasera przez wbudowany układ mikroprocesorowy. Opisana metoda jest często stosowana do oceny uszkodzeń trudno dostępnych miejsc kadłubów statków powietrznych [5].

4. ZNACZENIE BADAŃ ENDOSKOPOWYCH W DIAGNOSTYCE SILNIKÓW

Podstawowe rodzaje uszkodzeń części przepływowej silników turbinowych, które można wykryć metodami endoskopowymi zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1

Uszkodzenia elementów części przepływowej [5]

| ELEMENT | USZKODZENIE |
|--------------------|---|
| Łopatki sprężarki: | a) zanieczyszczenia: nalot, sadza b) uszkodzenia mechaniczne: rysy, wgniecenia, ślady zakleszczenia w kadłubie silnika c) ubytki wyrwy i pęknięcia |
| Łopatki turbiny | a) zanieczyszczenia produktami spalania powierzchni łopatek b) wypryski powierzchniowe (pęcherze) c) powiększony luz promieniowy turbiny ze śladami zakleszczenia d) nadpalenia z wykruszeniem łopatek na krawędziach e) ubytki powłoki ochronnej |
| Komora spalania | a) warstwa nagaru na łopatkach zawirowywacza b) przepalenia, pęknięcia rur ogniowych c) warstwa nagaru na powierzchni kołpaka wtryskiwacza |

5. OBIEKT I METODA BADAŃ

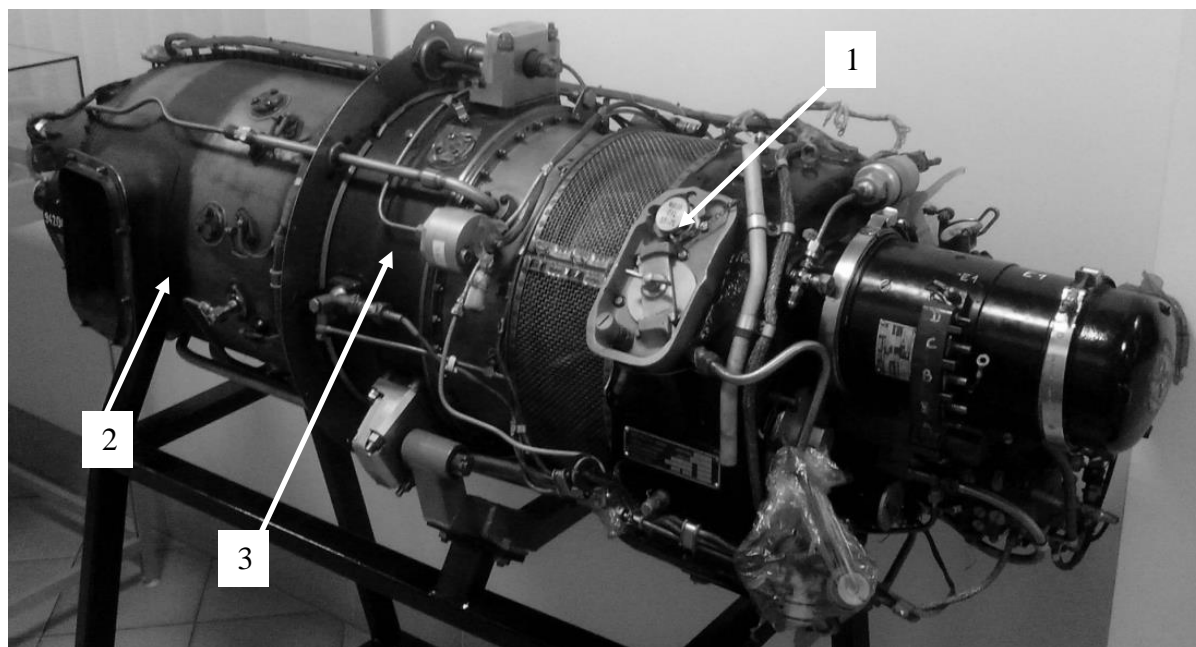
Badanie wizualne powierzchni, które tworzą przestrzeń wewnętrzną maszyn przepływowych umożliwia wykrycie, rozpoznanie i ocenę ewentualnych defektów pod kątem ilościowym. W rezultacie wynikiem badania jest ocena stopnia zużycia bądź zanieczyszczenia badanej powierzchni, a w konsekwencji całego elementu konstrukcyjnego. Można stwierdzić, że metodami endoskopowymi wykrywa się obecnie ok. 60% wszystkich uszkodzeń przepływowych silników spalinowych.

Obiektem przeprowadzonych badań był turbowalowy silnik M601T wytwarzany przez Walter Aircraft Engines, używany w wielu europejskich konstrukcjach lotniczych. Występuje w wielu wersjach konstrukcyjnych, przystosowanych do pracy w samolotach biznesowych, agroturystycznych i treningowych o zastosowaniu militarnym. W Polsce silnik M601 T jest

stosowany w samolocie turbośmigłowym PZL-130 Orlik, w wersji przystosowanej do pracy w warunkach akrobacyjnych (m.in. lot odwrócony).

Specyfikacja konstrukcji:

- kompresor 2-stopniowy osiowy oraz 1-stopniowa sprężarka promieniowa,
- turbina – 1-stopniowa turbina wysokiego ciśnienia i 1 turbina napędowa,
- komora spalania – pierścieniowa,



Rys. 6. Widok ogólny silnika M601T (1 – osłona siatkowa zasysanego powietrza, 2 – wylot spalin z dostępem do turbiny niskiego ciśnienia, 3 – sekcja komór spalania)

Badania tego silnika wykonane zostały za pomocą wideoskopu wyposażonego w wyświetlacz LCD i rozbudowany układ sterowania kamerą wziernikową.

Najważniejsze parametry techniczne wideoskopu:

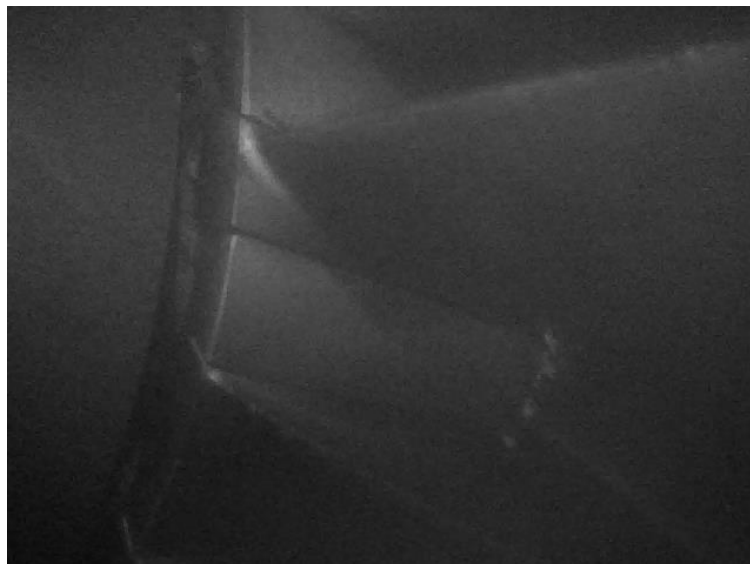
- średnica sondy pomiarowej 4,9 mm,
- długość końcówki pomiarowej 1 m,
- wyświetlacz LCD 3,5”;
- układ umożliwiający podgląd obrazu pod kątem 90° względem osi głowicy,
- oświetlenie zawierające 3 diody LED.

Po wstępnych oględzinach silnika i zapoznaniu się z jego budową wybrano dogodne miejsca do wprowadzenia głowicy pomiarowej. Demontaż rozpoczęto od odkręcenia siatkowych osłon sekcji sprężarek. W otrzymany otwór wprowadzono głowicę pomiarową, dzięki czemu możliwy był dostęp do sekcji sprężarek badanego silnika. W ten sposób uzyskano dokumentację zdjęciową łopatek wirnika sprężarki pierwszego stopnia (rys. 8).

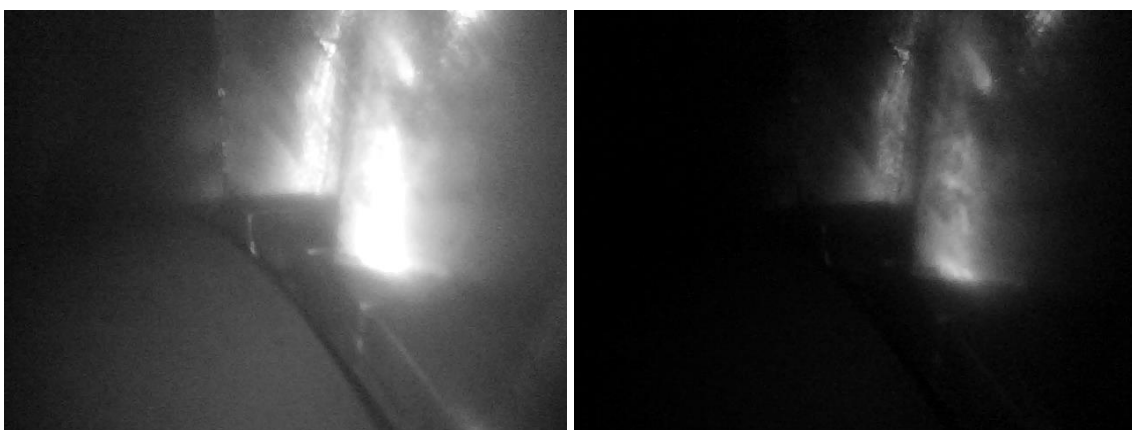
Obserwując zdjęcie łopatek przedstawione na rys. 9 zauważyć można istotną korzyść, jaką daje zastosowanie regulowanego natężenia światła w aparaturze badawczej. Zbyt duże natężenie sprawia, że światło odbija się od powierzchni łopatki i sprawia, że obraz staje się nieczytelny. W badanej sprężarce nie stwierdzono żadnych nieprawidłowości.



Rys. 7. Wideoskop wykorzystany do przeprowadzenia badań [7]



Rys. 8. Łopatki I stopnia sprężarki silnika m601t

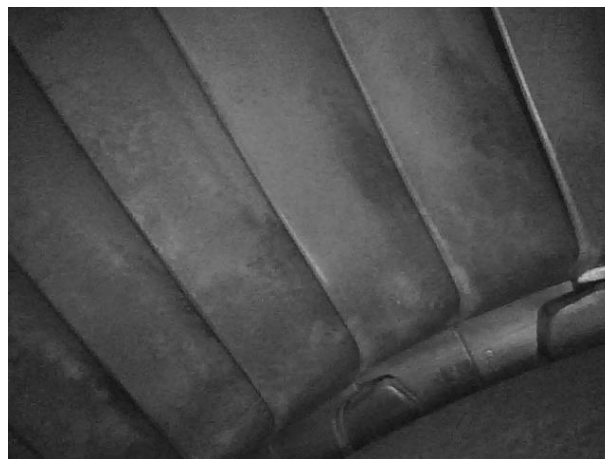


Rys. 9. Zależność czytelności uzyskanego obrazu od intensywności oświetlenia

W celu kontroli wizualnej turbiny badanego silnika, wprowadzono głowicę pomiarową w miejsce nr 2 na rys. 6. W czasie analizy uzyskanych obrazów zauważono pewne zmiany eksploatacyjne w postaci białego nalotu na powierzchni łopatek (rys. 10) oraz przebarwienia u nasady łopatek, spowodowane działaniem wysokiej temperatury.



Rys. 10. Łopatki turbiny niskiego ciśnienia – zaznaczono zauważony nalot



Rys. 11. Łopatki turbiny niskiego ciśnienia – widoczne przebarwienia u nasady łopatek

Rozmiar tych zmian nie stanowi przesłanki do demontażu silnika, świadczy jedynie o jakości procesu spalania w komorze. Celowe jest indeksowanie takich zmian wyglądu na powierzchniach silnie obciążonych elementów części przepływowej silnika oraz ich okresowa kontrola, aby porównać rozmiar zmian.

6. PODSUMOWANIE

Metody wizyjne stosowane w badaniach maszyn przepływowych pozwalają na prowadzenie diagnostyki eksploatacyjnej bez konieczności wymontowania (rozmontowania) badanego obiektu. Wpływa to znacząco na możliwość ograniczenia występowania zagrożeń, wynikających ze zużycia silnie obciążonych elementów turbinowych silników lotniczych. Zasadniczym problemem badań za pomocą endoskopu jest konieczność skomplikowanego manewrowania głowicą pomiarową, co w przypadku silników niedużych rozmiarów może stanowić dużą niedogodność.

References

1. Rolls-Royce plc. 1996. *The jet engine*. Derby: The Technical Publications Department. ISBN 0902121-235.
2. Dzierżanowski Paweł, Walerian Kordziński, Mieczysław Łyżwiński and others. 1983. *Turbinowe silniki odrzutowe*. [In Polish: *Turbine jet engines*]. Warszawa: WKiŁ. ISBN 83-206-0362-5.
3. Collective work. 2005. *Industrial endoscopy system guide version 2*: Olympus industrial.
4. Breen J., Stellingwerff M. 1995. "Application of optical and digital endoscopy". *Vienna: Proceedings 2nd EAEA Conference*.
5. Korczewski Zbigniew. 2008. *Endoskopia silników okrętowych*. [In Polish: *Endoscopy marine engines*]. Gdynia: AMW. ISBN 978-83-60278-20-8.
6. KARL STORZ Endoscope. 2006. *Techno pack with multipoint measuring system*. Industrial Group.
7. *Specjalistyczne narzędzia warsztatowe "KS Tools Videoskop"*. [In Polish: *Specialist workshop tools "KS Tools Videoscope"*]. Available at: <http://www.majsterkownia.pl/product-pol-1166-Videoskop-Ultimate-Vision-sonda-0-90-4-9mm-KS-Tools.html>.
8. Hlebowicz J. 2000. *Endoskopia przemysłowa*. [In Polish: *Industrial endoscopy*]. Warszawa: Biuro GAMMA. ISBN 83-87848-23-9.
9. Utkin Marek. 2004. „Silnik turbinowy”. [In Polish: „Turbine engine”]. *Młody technik* 07: 26-29. ISSN 0462-9760.
10. Balicki W. 2009. „Potrzeby i sposoby diagnozowania lotniczych silników turbinowych”. [In Polish: „Needs and methods for diagnosing aircraft turbine engines”]. *Prace Instytutu Lotnictwa* 4 (199): 109-116. ISSN 0509-6669.

Received 20.08.2015; accepted in revised form 21.12.2015



Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License