

## Diagnostic of turbine engine defects using visual testing

**Abstract:** The article contains a brief description of the turbofan engine. The contents included a breakdown of scheduled and unscheduled maintenance, defects description produced during normal operation and a description of the most common defects that can be found by using endoscopes / borescopes, rigid and flexible videoscopes. Described the methods of measurement with a special focus on the new method - 3D phase measurement.

### Diagnostyka uszkodzeń turbinowych silników przepływowych z zastosowaniem metod wizualnych

**Streszczenie:** Praca zawiera krótki opis turbinowego silnika dwuprzepływowego. W treści zawarty jest podział przeglądów na planowe i nieplanowe, opis usterek powstałych podczas normalnej eksploatacji silników turbinowych oraz opis najczęściej spotykanych usterek możliwych do wykrycia przy pomocy endoskopów/boroskopów sztywnych, giętkich i wideoskopów. Zobrazowane są metody pomiaru przy pomocy wideoskopów ze szczególnym zwróceniem uwagi na nową metodę – pomiar fazowy 3D. Podsumowanie zawiera wyjaśnienie korzyści z użytkowania wideoskopu XLG3 umożliwiającego pomiar nową metodą obrazowania uszkodzeń w 3D.

**Słowa kluczowe:** turbinowy silnik przepływowy, FADEC, endoskop, wideoskop, przeglądy planowe, przeglądy nieplanowe

#### 1. Opis przepływowego silnika turbinowego

Przepływowe silniki turbinowe należą do rodziny silników ciepłych o spalaniu wewnętrznym. Silniki te możemy podzielić na kilka grup:

- silniki turbo – śmigłowe stosowane w samolotach lotnictwa cywilnego i wojskowego,
- silniki turbo – odrzutowe stosowane w samolotach lotnictwa wojskowego,
- silniki turbo – wentylatorowe stosowane w samolotach lotnictwa cywilnego (rys. 1),
- turbinowe silniki śmigłowe stosowane w śmigłowcach cywilnych, wojskowych oraz służb policyjnych i ratowniczych,

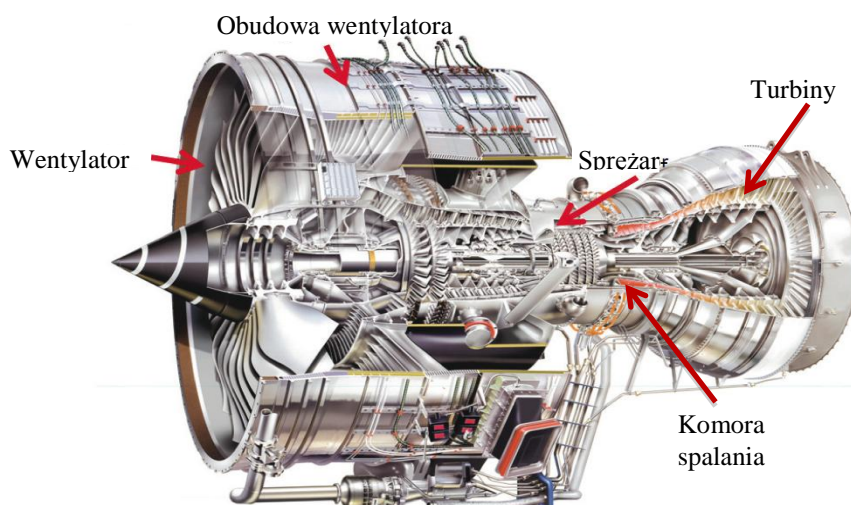
- turbinowe silniki do zastosowań specjalnych stosowane jako np.: turbo – rozruszniki, jednostki napędowe łodzi, jednostki napędowe czołgów, czy też jednostki napędowe agregatów prądotwórczych.

Przepływowy silnik turbinowy składa się z kilku podstawowych modułów:

1. wlot silnika,
2. zespół sprężarek niskiego i wysokiego ciśnienia,
3. komora spalania,
4. zespół turbin wysokiego i niskiego ciśnienia.

W poniższym opracowaniu omawiana będzie grupa silników turbo – wentylatorowych, dwuprzepływowych (rys. 1), w których strumień powietrza podzielony jest na przepływ zewnętrzny i wewnętrzny.

Przepływ zewnętrzny służy do wytwarzania ciągu niezbędnego do napędu statków powietrznych podczas startu i lotu oraz do hamowania po wylądowaniu (ciągu zwrotnego).



Rys. 1 Przekrój silnika turbowentylatorowego dwuprzepływowego [1]

Przepływ wewnętrzny służy do wytwarzania w zespole sprężarek odpowiedniego ciśnienia powietrza niezbędnego do pracy komory spalania i zespołu turbin. Turbiny za pośrednictwem wałów przenoszą napęd do zespołu sprężarek i wentylatora oraz do napędu wszystkich agregatów niezbędnych do pracy silnika takich jak:

- zespół pomp paliwowych,
- zespół pomp olejowych,
- prądnica zasilająca niezależnie elektroniczny układ sterujący silnika – FADEC<sup>(1)</sup>
- prądnice prądu przemiennego lub prądnice prądu stałego,
- pompy hydrauliczne.

## 2. Przeglądy – rodzaje oraz ich klasyfikacja

Przeglądy lotniczych silników turbinowych możemy podzielić na dwie grupy:

- przeglądy planowe,
- przeglądy nieplanowe.

Przeglądy planowe wynikają z programu obsługi producenta silnika. Do tych przeglądów zaliczamy przeglądy wykonywane w określonych odstępach czasowych np.:

- przed każdym lotem – przegląd przedlotowy,
- po każdym dniu lotnym – tzw. przegląd dzienny,
- po każdym tygodniu lotnym – tzw. tygodniowy,
- po określonej liczbie godzin lotu np.: po każdych 100 godzinach lotu,<sup>(2)</sup>
- po określonej liczbie cykli<sup>(3)</sup> np.: po każdych 750 cyklach etc.
- po określonej liczbie miesięcy np.: co 24 miesiące.

Przeglądy nieplanowe to te, których wykonania nie da się przewidzieć i zaplanować. Najczęściej są to przeglądy, które wykonuje się po wydarzeniach takich jak:

- usterki silnika,
- zassanie niepożądanych obiektów do silnika,
- zderzenie z ptakiem,
- przelot przez grad,
- przelot przez chmurę pyłu wulkanicznego etc.

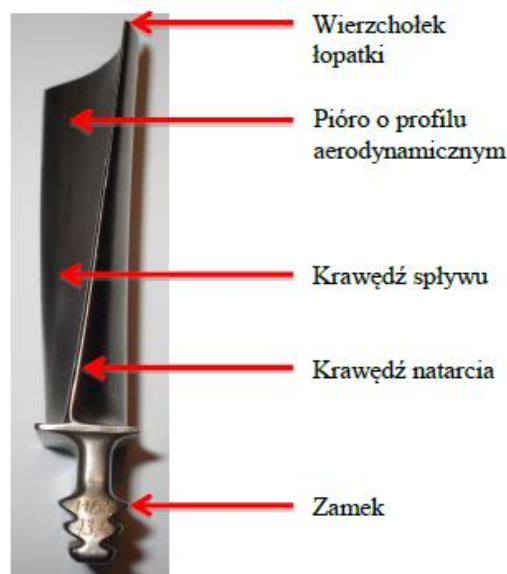
Właściwe stosowanie się do terminarza przeglądów okresowych ma kluczowe znaczenie dla utrzymania silnika w ciągłej sprawności co jest równoznaczne z utrzymaniem ciągłej zdolności do lotu samolotu.

## 3. Typowe uszkodzenia przepływowych silników turbinowych

Opisy uszkodzeń oraz metody diagnostyczne dotyczą wszystkich grup silników turbinowych.

Uszkodzenie silnika to pojęcie bardzo szerokie. W tym podrozdziale poruszone zostaną zagadnienia związane z naturalnym zużywaniem się elementów

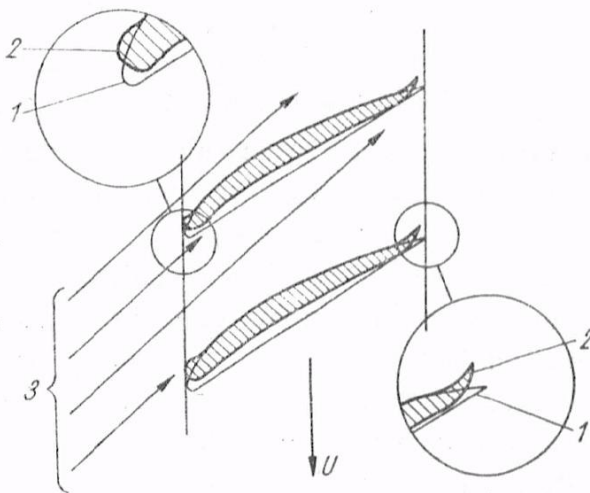
silnika wynikających z normalnej eksploatacji jak również uszkodzenia będące wynikiem niespodziewanych zdarzeń.



Rys. 2 Łopaska sprężarki osiowej

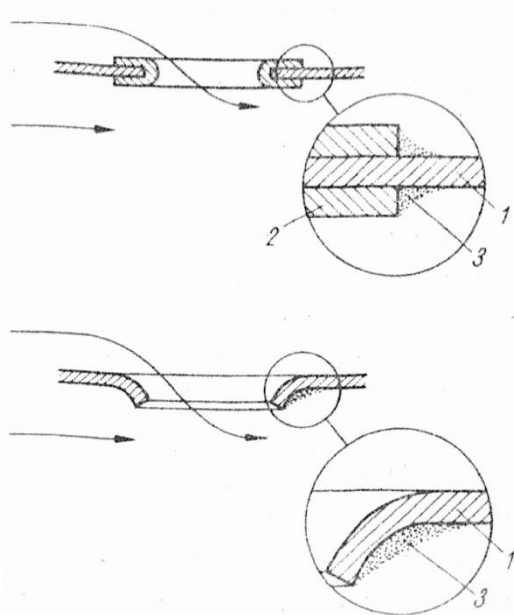
Rysunek 2 przedstawia łopaskę sprężarki osiowej, natomiast rysunek 3 przedstawia przekrój profilu tej łopatki.

Jako normalne zużycie eksploatacyjne należy rozumieć zmianę geometrii profilu aerodynamicznego łopatki spowodowaną zanieczyszczeniami – drobkami pyłu w powietrzu.

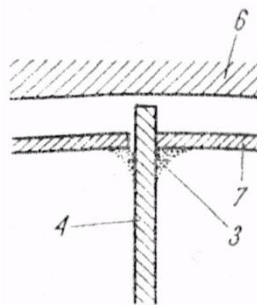
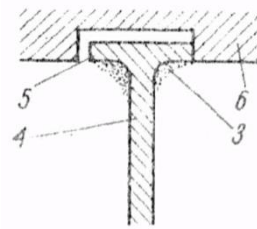


Rys. 3 Obszary zużycia łopatek sprężarek osiowych [3]: 1. kształt przed uszkodzeniem, 2. kształt łopatek uszkodzonych, 3. kierunek napływu strug

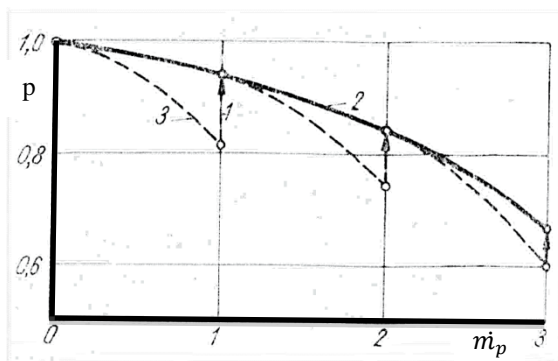
Rysunek 4 przedstawia schemat przepływu strug przez komorę spalania turbinowego silnika przepływowego oraz miejsca w których podczas eksploatacji zbierają się osady pyłów. Ze względu na duże prędkości przepływu powietrza przez komorę spalania jest to możliwe tylko w miejscach zacieńonych aerodynamicznie. Rysunek 5 przedstawia



Rys. 4 Zacięnięte aerodynamicznie strefy komór spalania umożliwiające tworzenie się osadów pyłowych [3]: 1 – ściana rury ogniowej, 2 – wzmocnienie otworu, 3 – osad pyłowy



Rys. 5 Zacięnięte aerodynamicznie strefy turbin [3]: 3 – osad pyłowy, 4 – kierownica turbiny, 5 – półka, 6 – ściana, 7 – pierścień



Wykres 1 Wpływ oddziaływania pyłu na moc silnika turbinowego [3]: 1 – po usunięciu osadów pyłowych, 2 – przebieg mocy przy postępującym zużyciu erozyjnym, 3 – przebieg mocy przy sumarycznym wpływie zużycia erozyjnego i osadów pyłowych

miejsca gdzie możliwe jest zbieranie się osadów pyłowych na łopatkach i kierownicach turbin. Osady te mają znaczący wpływ na zmianę parametrów pracy silnika poprzez zmianę geometrii łopatek sprężarki i turbiny oraz zanieczyszczenia kanałów przepływu powietrza i spalin. Wykres 1 przedstawia zależność mocy silnika  $p$  od masy  $m_p$  pyłu zasysanego z powietrzem przez silnik. Jest to zależność obrazująca spadek mocy silnika w trakcie eksploatacji.

Usunięcie osadów w silniku jest procesem zaliczanym do obsługi okresowych, mycie duktów powietrznych poprawia charakterystyki pracy silnika.

Uszkodzenia nie wynikające z normalnej eksploatacji to:

- zbita / zacięcia – (fot. 1, 4), (rys. 6), występują na krawędzi natarcia łopatek,
- wgniecenia – (fot. 2), (rys. 6), występują na powierzchni łopatki,
- pęknięcia – (fot. 30, (rys. 6, 7), mogą występować zarówno na powierzchni łopatek sprężarek, łopatek turbin oraz komór spalania,
- złamania – (fot. 4), najczęściej są konsekwencją pęknięć łopatek,
- zagięcia – mogą występować na końcówce łopatek (fot. 5), jak również u nasady łopatki (fot. 6), oraz krawędzi spływu łopatki (fot. 7),
- przegrzanie – (rys. 7),
- wypalenia – (rys. 7),
- starcie końcówki łopatki – (rys. 6),
- erozyjne uszkodzenia łopatek – (rys. 6).



Fot. 1 Zbitie krawędzi natarcia łopatki sprężarki



Fot. 2 Wgniecenie na powierzchni łopatki w okolicy krawędzi spływu



Fot. 3 Pęknięcia krawędzi spływu



Fot. 4 Złamanie łopatki sprężarki, zbiecie krawędzi natarcia

Wszystkie opisane uszkodzenia mogą być efektem niespodziewanych zdarzeń takich jak zassanie obcego obiektu (np. z pasa startowego), zderzenie z ptakiem lub gradem – niektóre z tych uszkodzeń mogą być efektem przekroczenia dopuszczalnych parametrów pracy silnika.



Fot. 5 Zagięcie końcówki łopatki sprężarki



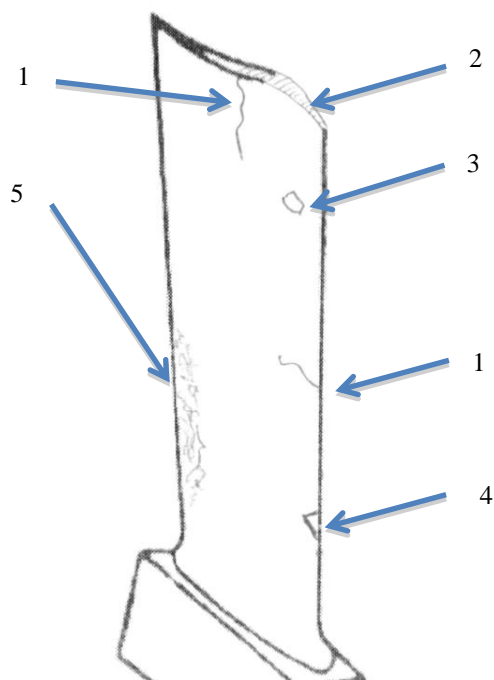
Fot. 6 Zgięcie łopatki u nasady

#### 4. Badania wizualne

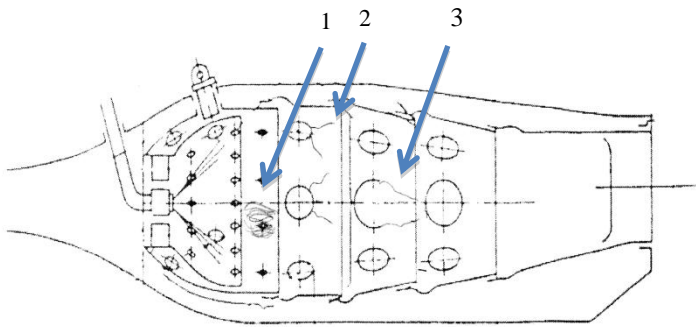
Badania wizualne to przeglądy, które pozwalają na powierzchniowe oględziny stanu technicznego. Ujawniają uszkodzenia opisane w punkcie 3. Badania wizualne podzielono na:

- oględziny wizualne bezpośrednie – badania te wykonywane są tzw. gołym okiem lub przy pomocy szkła powiększającego,
- oględziny wizualne pośrednie – ta grupa badań jest możliwa do wykonania za pomocą endoskopów lub wideoskopów, które podzielić możemy na:
  - a. endoskopy / boroskopy sztywne mogą mieć stały lub zmienny kąt obserwacji (rys. 8),
  - b. endoskopy giętkie, (rys. 9),
  - c. wideoskopy giętkie, (rys. 10).

Badania możliwe do wykonania za pomocą endoskopów i wideoskopów pozwalają na dokonanie oględzin powierzchniowych we wszystkich obszarach silników. Przy pomocy endoskopów sztywnych wykonuje się przeglądy sprężarek, turbin, jak również komór spalania turbinowych silników przepływowych. W niektórych przypadkach konieczne jest stosowanie przedłużek – specjalnych peryskopów do boroskopów sztywnych lub prowadnice do fiberoskopów/endoskopów, aby dotrzeć do miejsca pomiarów.

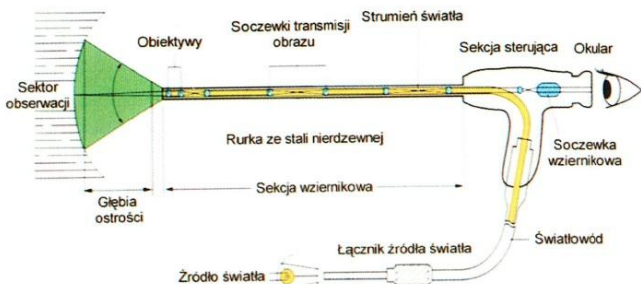


Rys. 6 Uszkodzenia łopatek: 1 – pęknięcia, 2 – starcie wierzchołka łopatki, 3 – wgniecenie, 4 – zbiecie / zacięcia, 5 – uszkodzenie erozyjne



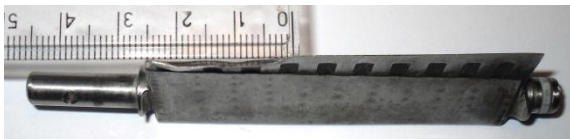
Rys. 7 Komora spalania [2]: 1 – przegrzania, 2 – pęknięcia, 3 - wypalenia

którego dokładny wymiar będzie znany. Tak na przykład podczas pomiaru łopatek sprężarki znana jest wysokość oraz szerokość łopatki – te dwa wymiary dają nam punkt odniesienia do porównania podczas pomiarów. W innych przypadkach mogą to być np. otwory technologiczne o znanych wymiarach. Często przyczyną błędnego pomiaru wykonanego metodą porównawczą jest niewłaściwe (nie prostopadłe) ustawienie obiektywu borskopu względem obserwowanego obiektu.

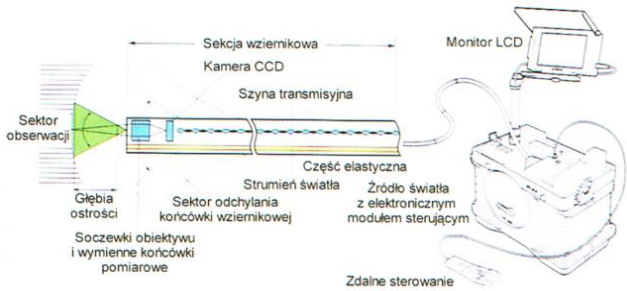


Rys. 8 Schemat ideowy borskopu sztywnego [5]

Pomiary dokonywane podczas badań wizualnych będą uzależnione od wybranej metody. Dla pomiarów bezpośrednich możemy zastosować suwmiarkę, czujnik mikrometryczny z którego odczyt będzie bezpośredni. Na zdjęciu 7 przedstawiono przykład pomiaru długości wygięcia łopatki kierownicy sprężarki. Pomiar taki jest możliwy tylko w przypadku uszkodzeń, do których mamy dostęp bezpośredni. Podczas badań z wykorzystaniem borskopu sztywnego pomiar ograniczony jest do metody porównawczej. Metoda ta charakteryzuje się małą dokładnością, ponieważ aby dokonać pomiaru konieczne jest znalezienie punktu odniesienia,



Fot. 7 Przykład pomiaru bezpośredniego za pomocą linijki



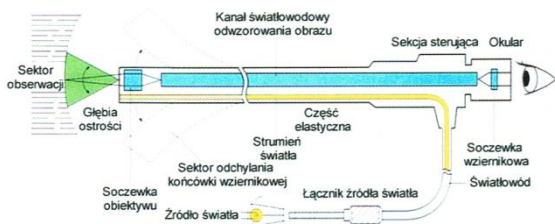
Rys. 10 Schemat ideowy wideoskopu [5]



Fot. 8 Pomiar metodą cienia [6]

Metoda pomiaru w trybie cienia pozwala zmierzyć:

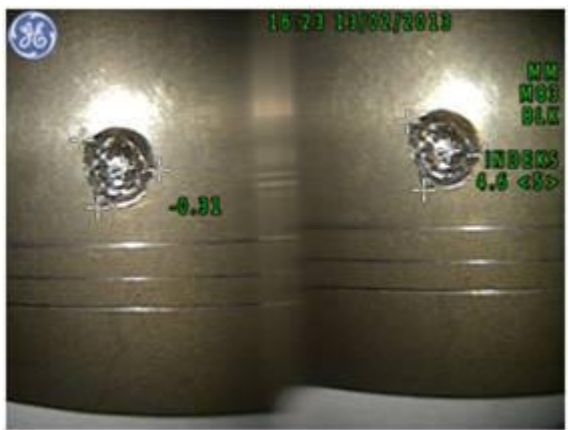
- odległość,
- skos – pomiary. Wykonywane przy braku możliwości usytuowania obiektywu prostopadle do mierzonego obiektu,
- głębokość,
- punkt – linia. Przed wykonaniem pomiaru pozwalający na wyznaczenie pomocniczej linii odniesienia,
- pole powierzchni,
- długość linii łamanej – pozwala zmierzyć długość uszkodzenia biegnącego wzdłuż linii, która nie jest linią prostą.



Rys. 9 Schemat ideowy borskopu giętkiego - fiberskopu [5]

Metoda pomiaru w trybie stereo pozwala zmierzyć:

- długość,
- punkt – linia (jw.),
- głębokość,
- pole powierzchni,
- długość linii łamanej (jw.).



Fot. 9 Pomiar metodą stereo

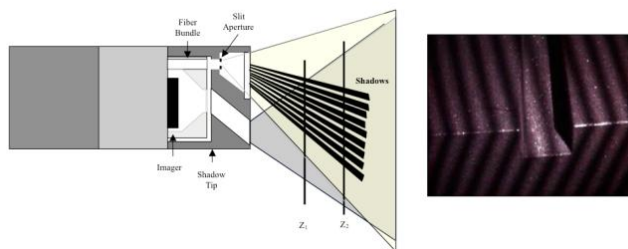
Szczegółowo metodę stereo i metodę cienia opisano w pracy [5].

Nowym rozwiązaniem w endoskopii jest pomiar fazowy 3D. Jest to zupełnie nowe rozwiązanie pozwalające na dokładny pomiar oraz wizualizację uszkodzeń.

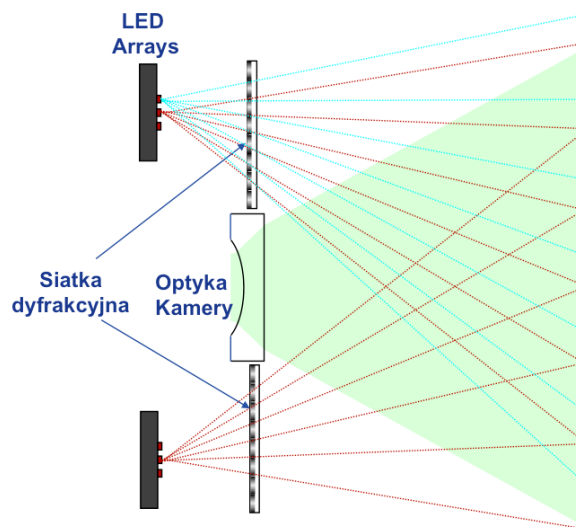
Metoda pomiaru w trybie fazowym pozwala zmierzyć:

- długość,
- punkt – linia, (jw.)
- głębokość,
- pole powierzchni,
- długość wieloodcinkowej linii łamanej,
- profil głębokości.

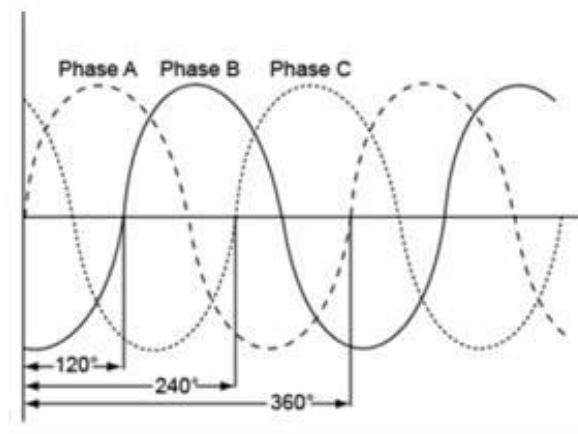
Pomiar fazowy przypomina pomiar metodą cienia jednak na mierzony obiekt wyświetlany jest wzór dokładnie uporządkowanych linii (rys. 11) za pomocą projektora przez siatkę dyfrakcyjną a nie jeden cień jak przy metodzie cienia. Linie te (rys. 12) wyświetlane są za pomocą trzech diod uruchamianych sekwencyjnie w przesunięciu czasowym (wykres 2) z superpozycji linii po uprzedniej kalibracji głowicy pomiarowej, jednostka centralna wylicza położenie każdego punktu widzianego przez kamerę umieszczoną w środku głowicy pomiarowej (fot. 10) [6]. Znając współrzędne każdego punktu tworzona jest tzw. chmura punktów na podstawie której określone są wszystkie wymiary opisane powyżej.



Rys. 11 Wzór dokładnie uporządkowanych linii cienia wyświetlana na mierzony obiekt [6]



Rys. 12 Zasada działania głowicy pomiarowej 3D [6]



Wykres 2 Przesunięcie fazowe wyświetlanych wzorów siatek [6]



Fot. 10 (po lewej) Głowica pomiarowa wideoskopu firmy EVEREST XLG3 [6]

Metoda pomiaru fazowego 3D daje możliwość graficznego przedstawienia uszkodzenia za pomocą:

- przekroju uszkodzenia (fot 12),

- trójwymiarowej mapy punktów będącej odzwierciedleniem faktycznego elementu (fot 13),
- trójwymiarowej mapy bitowej przedstawiającej profil głębokości (fot 14),
- trójwymiarowej mapy głębokości (fot 15).

Element mierzony przedstawiono (fot 11).

## 5. Możliwości naprawy uszkodzonych elementów silnika

Każde uszkodzenie wykryte podczas przeglądu planowego musi zostać poddane wnikliwej analizie pod kątem możliwości dopuszczenia do dalszej eksploatacji; na podstawie dokumentacji producenta. Jeżeli dalsza eksploatacja nie jest możliwa zachodzi konieczność naprawy uszkodzonego elementu. W przypadku gdy uszkodzenia nie da się naprawić w warunkach eksploatacyjnych (bez rozkładania silnika na części) – silnik musi zostać zdemontowany i odesłany do zakładu naprawczego.

Uszkodzenia, które mogą zostać dopuszczone do dalszej eksploatacji bez żadnych napraw (pod warunkiem że nie są przekroczone limity producenta) to:

- zbitcia na krawędzi natarcia łopatki pod warunkiem że przejścia są łagodne i nie noszą śladów pęknięć,
- wgniecenia na powierzchni łopatek.

Uszkodzenia, które mogą zostać dopuszczone do dalszej eksploatacji po uprzedniej naprawie to:

- zbitcia na krawędzi natarcia gdzie przejścia nie są łagodne – mogą zostać zapolerowane / wygładzone pod warunkiem że ta naprawa nie doprowadzi do przekroczenia dopuszczalnych limitów długości i głębokości podanych przez producenta silnika.

Niedopuszczalne są pęknięcia łopatek u nasady oraz wzdłuż osi przepływu czynnika. Przeoczenie takiego uszkodzenia może skutkować oderwaniem łopatki i zniszczeniem kolejnych stopni sprężarki lub turbiny a w konsekwencji zniszczeniem silnika.

Niedopuszczalne są również wypalenia oraz przegrzania w komorze spalania jak również łopatek turbin i kierownic łopatek turbin.

Przeglądy nieplanowe jak już wspomniano wcześniej wynikają z nagłych zdarzeń lub przekroczenia parametrów eksploatacyjnych.

Najczęstszym zdarzeniem wymagającym przeglądu jest zassanie obcego obiektu do silnika. Zdarzenie to może być wykryte w sposób następujący:

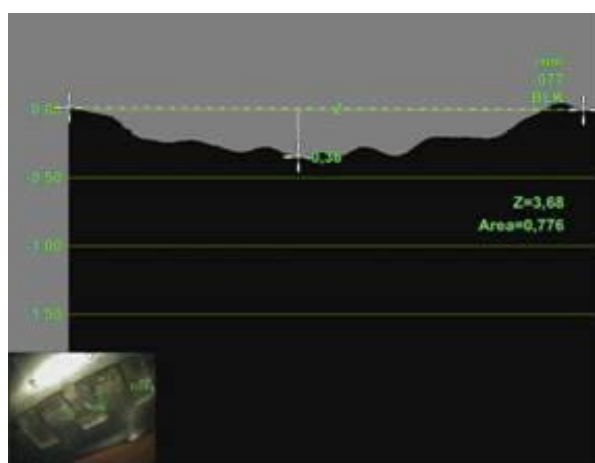
- podczas przeglądu przedlotowego we wlocie silnika zostaną znalezione resztki obiektu (np. pióra ptaka),
- zostanie zgłoszony przez załogę podwyższony poziom wibracji silnika podczas pracy.

W powyższych przypadkach niezbędne będzie wykonanie przeglądu metodą boroskopową w celu

określenia stanu technicznego wewnętrznych kanałów przepływowego silnika turbinowego.



Fot. 11 Fotografia przedmiotu mierzony metodą pomiaru fazowego 3D



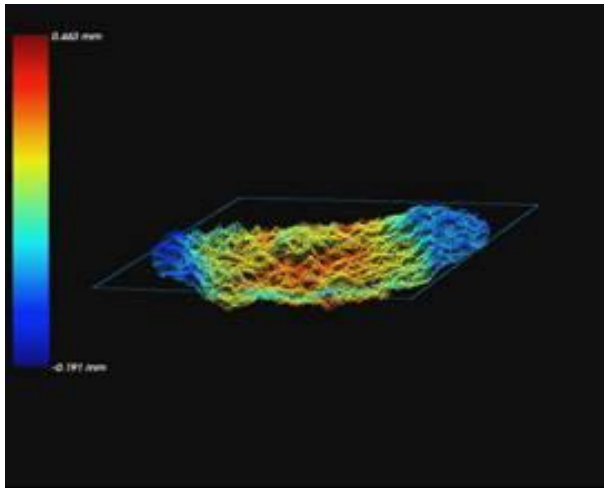
Fot. 12 Przekrój przez uszkodzenie wykonany metodą pomiaru fazowego 3D



Fot. 13 Chmura punktów tworząca trójwymiarowy obraz elementu badanego i uszkodzenia



Fot. 14 Chmura punktów tworząca trójwymiarowy profil uszkodzenia



Fot 15 Chmura punktów tworząca trójwymiarową mapę głębokości uszkodzenia

## 6. PODSUMOWANIE

Nie sposób w tak krótkim opracowaniu opisać wszystkie zagadnienia i przypadki, które mogą wystąpić w trakcie eksploatacji turbinowych silników przepływowych. Ograniczono się do opisu kilku metod diagnostycznych, jak również kilku najbardziej typowych uszkodzeń.

Endoskopia / boroskopia, jako metoda diagnostyczna znalazła szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach życia i nauki takich jak medycyna czy technika. Dzięki tym metodom wykorzystywanym do przeglądów oraz obrazowania elementów niedostępnych okiem nieuzbrojonym uzyskano możliwość szybkiej oceny stanu technicznego zespołów przepływowych silników turbinowych jak również możliwość zapisu zdjęć lub filmów w formacie cyfrowym, co daje możliwość porównywania znalezionych podczas przeglądów usterek znalezionych poprzednio i obecnie w celu sprawdzenia czy uszkodzenia postępują.

Ponadto opisana metoda pomiaru fazowego 3D daje szereg nowych możliwości niedostępnych dotychczas. Pozwala na bardzo precyzyjny pomiar oraz wizualizację uszkodzeń (fot. 11-15) co dla personelu wykonującego boroskopię jest dużym ułatwieniem, a w przypadku braku pewności czy widziany obraz jest wgłębieniem czy wypukłością; trójwymiarowa mapa punktów przedstawiająca profil uszkodzenia lub mapę głębokości rozwiewa wszelkie wątpliwości oraz ogranicza możliwości popełnienia błędu podczas interpretacji pomiaru.

## Nomenclature/Skróty i oznaczenia

- (1) FADEC – Układ sterowania pracą silników (ang. Full Authority Digital Engine Control).  
 (2) Godziny lotu – czas pracy silnika liczony od momentu startu do lądowania statku powietrznego.

- (3) Cykl pracy – cykl to okres od czasu uruchomienia silnika do momentu jego wyłączenia.

## Bibliography/Literatura

- [1] Peitsch D.: „Propelling the future – The meaning of ACARE VISION 2050 for the future development of propulsion systems for aircraft.” IV Kongres PTNSS (PTNSS-2011-SC-208) Radom 2011
- [2] Cheda W. Malski M.: „*Techniczny Poradnik Lotniczy Silniki.*” Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1984.
- [3] Dzierżanowski P. Korodziński W. Otyś J, Szczyński S. Wiatrek R.: „*Turbinowe silniki śmigłowe i śmigłowcowe.*” Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1985.
- [4] Lewińska-Romicka A.: „*Badania nieniszczące Podstawy Defektoskopii.*” Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, Warszawa 2001.
- [5] Korczewski Z.: „Metody pomiarowe stosowane w endoskopii silników okrętowych” – PTNSS-2008-SS2-201, Silniki Spalinowe 2/2008(133).
- [6] Materiały informacyjne firmy Everest :  
 • „Instrukcja obsługi wideoskopu XLGO”,  
 • „Instrukcja obsługi wideoskopu XLG3”.
- [7] Boliński B. Stelmaszczyk Z.: „Eksplatacja silników turbinowych.” Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1981.
- [8] Gajewski T. Lesikiewicz A. Szymanek R.: „Przepływowe silniki odrzutowe”. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1973.

Mr Michał Ryś, MSc. – Aviation Technician, Head of Hangar Services, GTL-LOT Airport Services, Ltd.

Mgr inż. Michał Ryś – Mechanik Lotniczy, Kierownik Obsługi Hangarowej, GTL-LOT Usługi Lotniskowe Sp. z o.o.

rysmichal@gmail.com

