

**THE DIAGNOSING OF TURBINES OF
TURBOMACHINERY WITH A VISUAL
NON-DESTRUCTIVE METHOD**

**DIAGNOZOWANIE TURBIN WIRNIKOWYCH
MASZYN PRZEPLYWOWYCH NIENISZCZĄCĄ
METODĄ WIZUALNĄ**

**Adam Bagiński¹, Artur Kulaszka²,
Andrzej Szczepankowski², Janusz Szymczak²**

¹Inspektorat Wsparcia Sił Zbrojnych RP, ²Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych,
e-mail: ¹abag62@wp.pl, e-mail: artur.kulaszka@itwl.pl, assz@op.pl

Abstract: *While operating turbomachinery, many and various damages may occur to turbine components, in particular to blades thereof. The most frequent causes of damages/failures are as follows: material overheating, thermal fatigue due to both overtemperature itself and the time it affects the object(s), chemical activity of exhaust gas, maintenance- and operation-attributable errors. The paper has been intended to analyse causes of damages/failures to gas turbine blades, how these damages grow, and how they affect reliability of the turbomachinery. Pointed out are advantages of applying the visual inspection technique (being one among plenty of non-destructive testing methods) to diagnose the health of gas turbine blades, in particular those that increase safety and reduce cost of operating turbomachinery.*

Keywords: *gas turbine, blade, damage, diagnostics*

Streszczenie: *W procesie eksploatacji wirnikowych maszyn przepływowych występują różnego rodzaju uszkodzenia elementów turbin, a zwłaszcza ich łopatek. Najczęstszymi przyczynami uszkodzeń są przegrzanie materiału, zmęczenie cieplne łopatek spowodowane zarówno nadmierną temperaturą, jak i czasem jej trwania, aktywnością chemiczną spalin, błędami remontu i eksploatacji. W artykule przedstawiono analizę przyczyn i rozwoju uszkodzeń łopatek turbin gazowych, mających wpływ na niezawodność wirnikowych maszyn przepływowych. Wskazano zalety stosowania wizualnej metody badań nieniszczących w diagnozowaniu stanu łopatek turbin gazowych związane ze zwiększenia bezpieczeństwa i zmniejszenia kosztów eksploatacji wirnikowych maszyn przepływowych.*

Słowa kluczowe: *turbina gazowa, łopaska, uszkodzenie, diagnostyka*

1. Wprowadzenie

Badania wizualne powierzchni wewnętrznych wirnikowych maszyn i urządzeń przemysłowych z zastosowaniem sond endoskopowych stanowią obecnie jedną z podstawowych metod diagnostyki technicznej. Doprowadziły do tego trudności w rozpoznawaniu uszkodzeń ich części przepływowej na podstawie zmian wartości mierzonych dotychczas parametrów termodynamicznych oraz właściwej interpretacji symptomów powstających defektów, gdyż te były często identyfikowane jako objawy nieuniknionych i ciągłych procesów ich zużywania się w okresie ich przewidywanej eksploatacji. Pomocne w takich wypadkach okazały się być badania wizualne, gdyż te nie wymagają demontażu badanego obiektu na podzespoły i części składowe, a wykorzystywane do tego oprzyrządowanie nie oddziałuje na badany obiekt.

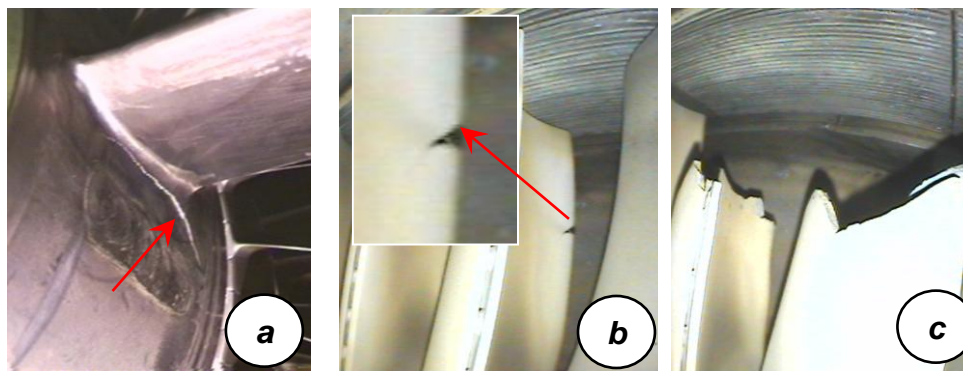
Takie uszkodzenia elementów jak pęknięcia zmęczeniowe, odkształcenia mechaniczne i cieplne, przegrzania i przepalenia, korozja chemiczna i/lub wysokotemperaturowa czy erozja mechaniczna i gazowa są głównymi przyczynami przedwczesnego wyprowadzania wirnikowych maszyn przepływowych (WMP) z eksploatacji. Nie wykryte w odpowiednim czasie mogą skutkować poważnymi awariami, stanowiąc przy tym zagrożenie dla zdrowia i życia ich użytkowników.

Uzyskane podczas badań wizualnych wyniki umożliwiają wczesne zlokalizowanie ognisk uszkodzeń i okresową obserwację postępującej degradacji elementów maszyn, co umożliwia ich dalszą, bezpieczną, bo nadzorowaną eksploatację. Pozwala to w pełni wykorzystać ich rewers bez potrzeby przedwczesnego wycofania z eksploatacji bądź wykonywanie odpowiednio wcześniej niezbędnych dla uniknięcia awarii napraw. To zaś zaważyło na tym, że endoskopia stała się jedną z podstawowych, powszechnie stosowanych metod badań nieniszczących jakie znalazły zastosowanie w transporcie lotniczym. Przeprowadzanie tego rodzaju badań jest uzasadnione i to zarówno z ekonomicznego, jak i technicznego punktu widzenia, gdyż zwiększając bezpieczeństwo eksploatacji oraz skracając czas identyfikacji bieżącego stanu technicznego maszyny redukuje się jednocześnie koszty jej użytkowania.

2. Określenie częstości kontroli endoskopowej przestrzeni wewnętrznej maszyn

Istnieje wiele algorytmów umożliwiających określanie częstości wykonywania badań nieniszczących, ale w większości przypadków odnoszą się one do stacjonarnych WMP lub napędów samolotów transportowych, a więc tych o przewidywalnej liczbie cykli zmęczeniowych. Bardziej złożona sytuacja będzie miała miejsce w przypadku wojskowych samolotów bojowych czy szkolno-bojowych, dla których histogram obciążenia elementów krytycznych jednostek napędowych jest uzależniony od rodzaju wykonywanej misji, czasu jej trwania, a nawet nawyków samego pilota. Ważne jest więc, aby diagnozowany

płatowiec był wyposażony w urządzenie rejestrujące parametry i czas pracy jego zespołu napędowego oraz raportował i dokumentował wszystkie przypadki przekroczeń eksploatacyjnych. Szczegółowej analizie powinny każdorazowo podlegać zarówno rejestrowane na bieżąco jak i zarchiwizowane parametrów pracy silnika, co umożliwi bieżące monitorowanie stanu eksploatowanej maszyny jak i obserwowanie symptomów świadczących o postępującej degradacji jej stanu lub zbliżającej się awarii.



Rys. 1. Widok fragmentów: jednej ze stójek profilowanych korpusu wlotowego i wirnika turbiny wysokiego ciśnienia (TWC) silnika odrzutowego [7]. a - pęknięcie wzdłuż połączenia spawanego jednej ze stójek profilowanych z gniazdem korpusu przedniego węzła łożyskowego sprężarki niskiego ciśnienia, b - perforacja na krawędzi natarcia łopatek wirnika turbiny, c - wyłamanie dwóch, sąsiadujących ze sobą łopatek TWC

Jak ważna jest analiza diagnostycznych parametrów pracy można przedstawić na przykładzie zdarzenia, do którego doszło podczas lądowania jednego z samolotów bojowych, kiedy to automatyczny układ przekroczeń zasygnalizował pilotowi nadmierny wzrost drgań silnika. Podczas przeglądu jego układu wlotowego stwierdzono pęknięcie wzdłuż połączenia spawanego jednej ze stójek profilowanych z gniazdem korpusu przedniego węzła łożyskowego sprężarki niskiego ciśnienia (rysunek 1a). Natomiast podczas endoskopowego przeglądu stanu powierzchni elementów wewnętrznych jego części przepływowej zauważono miejscowe wypalenia powierzchni, pęknięcia i perforację krawędzi natarcia (KN) oraz wyłamanie dwóch, sąsiadujących ze sobą w wieńcu piór łopatek wirnika turbiny wysokiego ciśnienia (rysunek 1, b, 1c).

Wszystko wskazuje na to, że do powyższego zdarzenia by nie doszło, gdyby odpowiednio wcześniej zauważono symptomy świadczące o możliwości wystąpienia tego zdarzenia, a w tym zmianę amplitudy drgań silnika i wykonano badania wizualne traktu gazowego silnika. Jak bowiem wynika z doświadczeń związanych z wprowadzonych w konsekwencji tego typu zdarzeń programów diagnostycznych, degradacja zespołu turbiny jest procesem rozwiniętym w czasie. W pierwszej kolejności dochodzi do miejscowych wypaleń warstwy

izolująco-ochronnej, powstawania wżerów korozyjnych, pęknięć i kraterów w materiale rodzimym łopatek wirnika turbiny [1]. Konsekwencją tego jest urwanie się piór łopatek w wyniku osłabienia materiału i oddziaływania złożonego układu sił i temperatury.

Przystępując zatem do diagnozowania stanu technicznego WMP, jak i określając zasady wykonywania późniejszych przeglądów endoskopowych, a w tym ich częstość i zakres badań przestrzeni wewnętrznych czy sposób oceny uszkodzeń, muszą być brane pod uwagę wszystkie inne, dostępne dane. Ułatwia to też podjęcie decyzji, co do zasad dalszej eksploatacji diagnozowanej maszyny.

Kolejnym ważnym zagadnieniem które należy brać pod uwagę jest subiektywna ocena stanu technicznego WMP uzależniona od wiedzy i kompetencji osób ją wykonujących. Dostępne cyfrowe urządzenia przetwarzające służą bowiem jedynie do deszyfracji i graficznego zobrazowania parametrów, pozbawione są natomiast algorytmów automatycznej identyfikacji przyczyn obserwowanych odstępstw. W związku z powyższym, już na tym etapie decydującą rolę w lokalizacji źródła problemu technicznego odgrywa nabyte przez lata praktyki doświadczenie personelu, zwłaszcza w tych przypadkach, gdy te wywołane są występowaniem kilku niesprawności na raz. Duży wpływ na to mogą mieć również nieprecyzyjnie zdefiniowane przez producenta warunki techniczne lub ich brak w danym zakresie, gdyż te stanowią najczęściej ograniczenia obszaru roboczego po przekroczeniu których należy się liczyć z przyśpieszonym zużyciem zmęczeniowym jego elementów. Jest to powodem dla którego nie znajdują one bezpośredniego zastosowania w rozwiniętym systemie diagnozowania obiektu.

Równie istotną kwestią jest to, w jakim stopniu przyszły obiekt badań jest podatny diagnostycznie, a w tym i przystosowany konstrukcyjnie do wykonywania badań endoskopowych. Tym bardziej, że większość wcześniejszych konstrukcji WMP, nie posiadając odpowiednich otworów technologicznych nie jest przystosowana do badań metodą wizualną. Wymusza to każdorazowo na użytkowniku konieczność demontażu niektórych z podzespołów lub części, takich jak na przykład wtryskiwacze paliwa czy zapłonniki. Takie działanie nie tylko wydłuża czas wykonywania badań, a przez to i podraża koszty ich wykonania, ale stwarza też ryzyko uszkodzenia demontowanych podzespołów lub badanego obiektu.

Dlatego bezpieczny horyzont prognozowania stanu technicznego WMP na podstawie wyników badań endoskopowych określa się uwzględniając: powyższe spostrzeżenia, dane statystyczne o istniejącym strumieniu uszkodzeń danego typu maszyny i dopuszczalny poziom ryzyka wystąpienia uszkodzenia krytycznego. Wskazane jest również, aby czasokres wykonywania przeglądów był skorelowany z planem obsługi technicznych WMP.

Przykładowy algorytm badań nieniszczących metodą wizualną zobrazowano w tabeli 1.

Tabela 1. Algorytm badania lotniczych WMP metodą wizualną

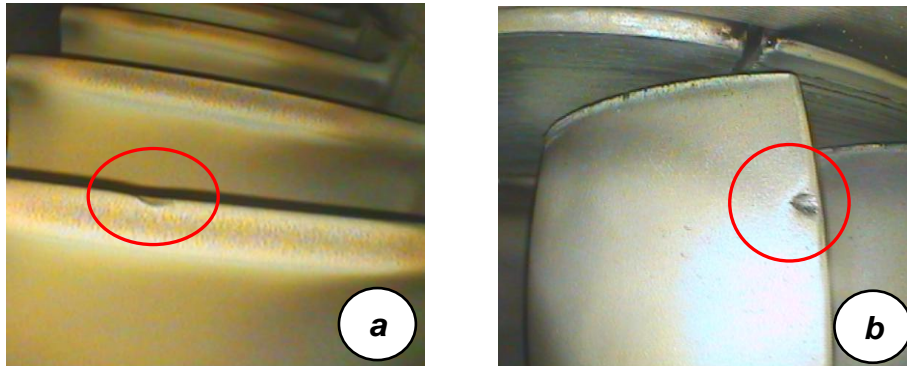
L.p.	Zakres badań	Wynik	Prognoza [h]
1.	Pierwszy przegląd silnika	bez uwag drobne uszkodzenia uszkodzenia krytyczne	25 ±5 12 ±3 Wycofać
2.	Kolejny przegląd silnika	bez uwag drobne uszkodzenia rozwinęte uszkodzenia drobne uszkodzenie w strefie krytycznej duża dynamika zmian uszkodzeń uszkodzenia krytyczne	50 ±5 25 ±5 12 ±3 12 ±3 12 ±3 wycofać
3.	Przedłużenie ресурсu technicznego i/lub między remontowego	bez uwag drobne uszkodzenia rozwinęte uszkodzenia drobne uszkodzenie w strefie krytycznej duża dynamika zmian uszkodzeń uszkodzenia krytyczne	25 ±5 12 ±3 6 ±3 6 ±3 wycofać wycofać

Powyższy algorytm umożliwi bezpieczną eksploatację tych WMP, które są diagnozowane metodą endoskopową, zapewniając jednocześnie optymalizację kosztów i ograniczenie uciążliwości wykonywanych badań. Tym nie mniej stanowi on też pewnego rodzaju przykładowe uogólnienie, a każdy nie unormowany przez producenta przypadek uszkodzenia WMP powinien być analizowany odrębnie, z uwzględnieniem znanych i podobnych przypadków, a stwierdzanych i przez innych użytkowników.

3. Ilościowe badania endoskopowe

Ważne jest, aby osoby wykonujące badania wizualne nie tylko znały budowę i zasadę działania diagnozowanego obiektu, ale i posiadały niezbędny zasób wiedzy dotyczącej przyczyn inicjacji stwierdzanych uszkodzeń, co w efekcie znacznie przyspiesza postawienie prawidłowej diagnozy.

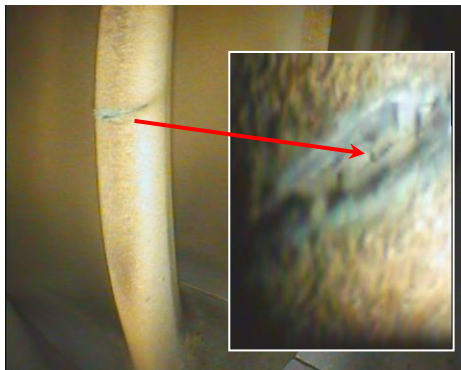
Przykładem mogą być doświadczenia związane z eksploatacją śmigłowcowych i śmigłowych silników turbinowych, gdyż to w warunkach zapylenia środowiska ich pracy dochodzi do intensywnego zużywania się ich części [2]. Jednakże to nie wykonywanie startów i lądowań na przygodnych lądowiskach stanowi podstawową przyczynę uszkodzeń mechanicznych zespołów sprężarek czy turbiny, gdyż za takie należy uznać te będące skutkiem zassania pojedynczych ciał obcych bądź zderzeń z ptakami. Dochodzi do tego w sposób losowy, bądź z powodu braku należytej dbałości ze strony personelu technicznego o zachowanie czystości płaszczyzn postojowych, czy też tych, przeznaczonych do wykonywania prób, jak i dróg kołowania czy startu.



Rys. 2 Łopaska wirnika TWC silnika turbinowego [7]. a - wgniecenie na krawędzi natarcia, b - wgniecenie na krawędzi spływu pióra łopatki

Tego rodzaju uszkodzenia są typowymi dla zespołów sprężarek WMP, ale stwierdza się je również na łopatkach wirnikowych turbin. Także na ich powierzchniach mogą wystąpić wgniecenia (rysunek 2), zarysowania warstwy izolacyjno-ochronnej stając się przez to źródłem miejscowej koncentracji naprężeń lub ogniskiem korozji, co w konsekwencji prowadzi do perforacji i pęknięcia pióra łopatki (rysunku 3).

Uszkodzenia mechaniczne elementów wirników nie muszą być tylko skutkiem zasysania przez WMP ciał obcych. Do podobnych skutków może dochodzić w wyniku odrywania się w komorze spalania produktów niepełnego spalania takich jak nagary i ich zderzeń z elementami zespołu turbiny (rysunek 4).



Rys. 3 Pęknięcie na KN łopatki wirnika TWC [7]



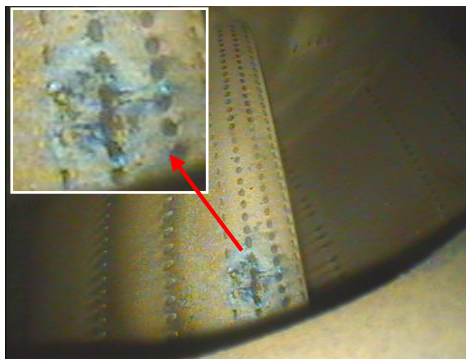
Rys.4 Wygięcie na KN łopatki wirnika turbiny silnika [7]

Niewłaściwe ciśnienie paliwa, pogorszone jego właściwości fizyko-chemiczne przez różnego rodzaju zanieczyszczenia, wadliwe osadzenie wtryskiwacza w głowicy rury żarowej, powodują tworzenie się nagaru na wtryskiwaczach (rysunek 5) stając się powodem niewłaściwego rozpylania paliwa. Skutkiem tego występuje zaburzenie organizacji procesu spalania, a co za tym idzie rozkładu pola

temperatury i chłodzenia poszczególnych elementów gorącej części silnika. Konsekwencją tego są przegrzania materiału komory spalania, łopatek aparatu kierującego (AK) wirnika i turbiny (rysunek 6) [6].



Rys.5 Nagar na wtryskiwaczu paliwa silnika turboodrzutowego [6]

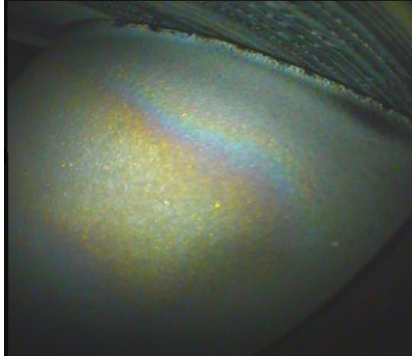


Rys. 6 Wypalenie na KN łopatki AK TWC silnika turboodrzutowego [7]

O tym, że przedstawiony powyżej proces destrukcji WMP przebiega w dłuższym okresie czasu i to już prawdopodobnie od chwili jego przekazania do eksploatacji mogą świadczyć rejestrowane ślady korozji i erozji gazowej. Sprzyja temu także obecność w paliwie śladowych ilości W, Mo czy Co, a przede wszystkim związków siarki, gdyż wytwarzane zgodnie ze standardem wojskowych norm obronnych paliwo lotnicze typu Jet A-1 (F-35) może zawierać maksymalnie do 0,3% S w jednostce jego objętości. To z kolei sprawia, że zawartość SO_2 w spalinach może nawet dochodzić do około 0,014%. Stąd wniosek, że im większa zawartość tego pierwiastka w paliwie tym większa jest zawartość SO_2 i SO_3 w spalinach, co z kolei powoduje, że przy między innymi nieprawidłowej organizacji procesu jego spalania, wzrasta groźba uszkodzeń narażonych na ich oddziaływanie elementów turbin [3, 5].

Dopuszczenie do pracy wirników turbin silnika w temperaturze okresowo przekraczającej jej wartość maksymalną, czego symptomem mogą być stwierdzone przebarwienia powierzchni łopatek (rysunek 7) skutkuje nie tylko w późniejszym okresie jego eksploatacji nadmiernym pęczaniem ich materiału, ale i pękaniem łopatek np. w części wierzchołkowej czy na krawędzi natarcia (rysunek 8, 9).

Inny równie niebezpieczny rodzaj defektów stanowią uszkodzenia chemiczne łopatek turbin, mogące doprowadzić do powierzchniowych wżerów korozyjnych, a w konsekwencji do pęknięć ich materiału. Na generowanie i rozwój tego rodzaju uszkodzeń duży wpływ ma niezachowanie w procesie produkcji lub remontu parametrów nakładania warstw ochronnych.



Rys. 7 Przebarwiona powierzchnia łopatki TWC silnika turbinowego [7]



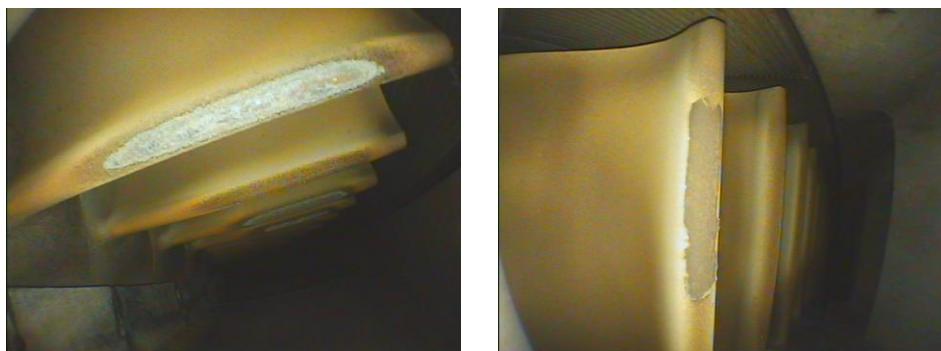
Rys. 8 Wzdłużne, pęknięcia pióra łopatki TWC silnika turbinowego [7]



Rys. 9 Łopatki wirnika TWC silnika turbinowego - pęknięcia na KN łopatki [7]

Opisując rozwój korozji gazowej stopów, które wykorzystywane są do wytwarzania elementów turbin należałoby podzielić ten proces na kilka etapów, z których najważniejszymi są te reakcje chemiczne, które przebiegają na granicach faz metal - tlenki oraz tlenki - atmosfera oraz dyfuzja reagentów poprzez warstwę produktów wytwarzających się na ich powierzchniach. Opisując natomiast to, od czego zależy szybkość rozwoju tego rodzaju korozji należałoby przede wszystkim stwierdzić, czy na powierzchni stopu wytwarza się zwarta, czy też porowata warstwa produktów korozji, gdyż w tym pierwszym przypadku może ona spełniać działanie ochronne. Szybkość korozji jest wówczas zależna od dyfuzji reagentów w warstwie tlenkowej i jest ona najczęściej odwrotnie proporcjonalna do grubości warstwy. Pomijając różnorodność oznak morfologicznych tego typu korozji, można wyróżnić w tego rodzaju warstwie wierzchniej jednoczesną obecność takich produktów, jak tlenki i siarczki. Z tym jednak, że te pierwsze będą się znajdować w warstwie zewnętrznej, a te drugie w fazie bezpośrednio przylegającej do stopu rodzimego. W miarę upływu czasu pracy silnika, obserwuje się tendencję do zmniejszania się zawartości tych pierwszych w warstwie wierzchniej i zwiększania się w jej głębi, a tych drugich, w odwrotnym kierunku [4, 5].

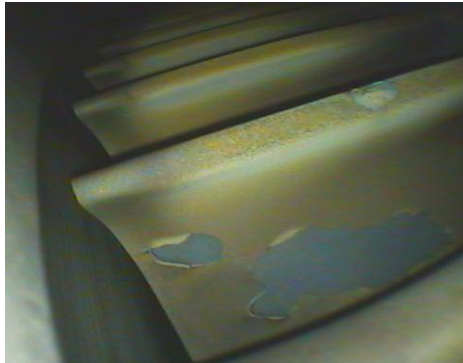
Duży wpływ na podwyższenie skłonności tego rodzaju stopów do korozji międzykrystalicznej ma praca WMP w warunkach o zmiennej temperaturze i do tego okresowo przekraczającej jej wartość dopuszczalną, co powoduje zmniejszenie zawartości Cr w strefie przegrzania materiału oraz obecność na granicy ziaren stosunkowo dużych węglików [4, 5]. Dalsza praca w tych warunkach zespołu turbiny doprowadza między innymi do lokalnego wykruszania się przez przepływające spaliny produktów warstwy wierzchniej.



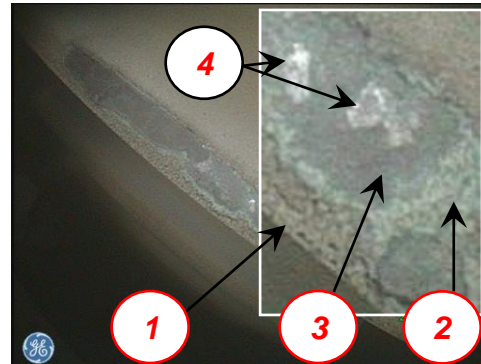
Rys. 10 Wypalenia warstwy izolacyjno - ochronnej na KN łopatkach wirnika TWC

W trakcie wykonywania badań wykrywa się więc takie wady, jak te zobrazowane na rysunku 10, kiedy to najpierw zauważono wypalenie warstwy izolacyjno - ochronnej na powierzchni krawędzi jednego z piór łopatek w wieńcu wirnika turbiny WMP, zarówno przed jak i po wyremontowaniu łopatek co może nasuwać wątpliwości co do jakości wykonanego usprawnienia lub samej technologii jej regeneracji. Natomiast oczywiste skutki błędów w procesie remontu zobrazowano na rysunkach 11 i 12. Dlatego nie chcąc dopuścić do przyspieszonej degradacji podzespołu należy eliminować z procesu eksploatacji te WMP z tego rodzaju wadami. Pozostawienie bowiem łopatki z takim defektem, doprowadziłoby najpierw do odrywania się z jej krawędzi natarcia warstwy ochronnej, a następnie do korozji chemicznej jej materiału rodzimego i ostatecznie do jej wyłamania się. Rozpatrując przyczyny różnego rodzaju uszkodzeń, jak i ich skutki ważne jest aby planując i wykonując badania endoskopowe umiejętnie odróżnić te wynikające z błędów konstrukcji od tych, które mogą mieć swoje źródło w technologii wytwarzania bądź remontu lub w sposobie ich eksploatacji. Ułatwia to bowiem podejmowanie decyzji, co do sposobu dalszego, bezpiecznego użytkowania diagnozowanej WMP.

Podejmując różnego rodzaju przedsięwzięcia profilaktyczne zmierzające do poprawy bezpieczeństwa eksploatacji lotniczych WMP nie tylko wykonuje się między innymi przeglądy wizualne stanu powierzchni elementów przestrzeni wewnętrznych podzespołów z jednoczesną rejestracją uszkodzeń, ale i bieżącą analizą zachodzących zmian ich stanu.

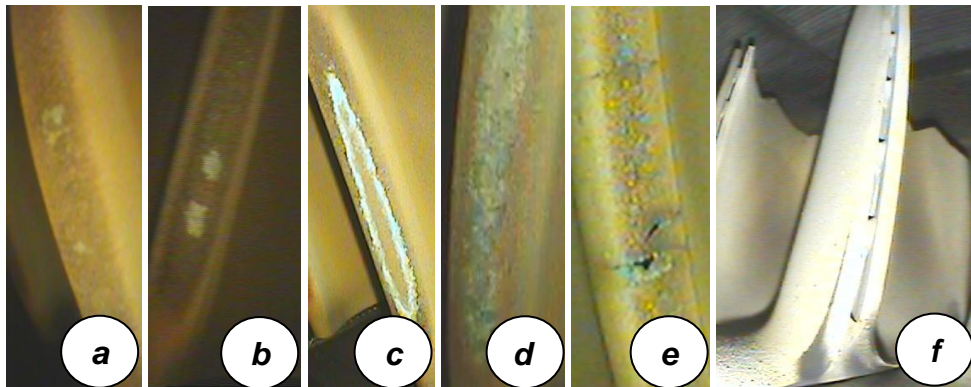


Rys. 11. Łuszczenie się warstwy izolacyjno – ochronna z łopatki wirnika TWC



Rys. 12. Fragment uszkodzonej krawędzi łopatki wirnika TWC silnika turbinowego, warstwy: 1 - ochronna, 2 - podkładu, 3 - izolacyjna, 4 - materiał rodzimy łopatki

Przykładem może być zilustrowana na rysunku 13 destrukcja jednego z piór łopatek wirnika turbiny wysokiego ciśnienia silnika turbinowego.



Rys. 13 Fragment łopatki wirnika TWC silnika turbinowego. Kolejno następujące po sobie a ÷ f etapy degradacji jej pióra [7]

Na rysunkach 13 a, b widoczne są uszkodzenia wierzchniej warstwy ochronnej krawędzi natarcia łopatek. Pole powierzchni uszkodzenia wzrasta wzdłuż wysokości pióra wraz z liczbą godzin przepracowanych przez silnik.

Po przepracowaniu kolejnych 25 godzin i to w zbliżonych do poprzednich warunkach zauważa się, że na pewnym jego obszarze nie tylko brak jest już wierzchniej warstwy ochronnej, ale i widoczna jest warstwa materiału rodzimego łopatki. Silnik ten przepracował w sumie od dnia jego zabudowy w płatowiec około 80 godzin, a uszkodzenie dotyczyło około 80% łopatek wirnika turbiny.

Pomimo występujących uszkodzeń, silnik ten nadal był eksploatowany w formie eksploatacji nadzorowanej, gdyż z zebranych przez lata badań doświadczeń wynikało, że w kolejnej fazie destrukcji pióra dojdzie do powstania w uszkodzonych miejscach wżerów korozyjnych w materiale rodzimym łopatki (rysunek 13d), a dopiero po tym do perforacji jej krawędzi natarcia (rysunek 13e) co może już zagrażać dalszej bezpiecznej jego eksploatacji. W kolejnym etapie doszłoby już do wyłamania się jej części (rysunek 13f). Dlatego w opisywanym przypadku proces eksploatacji silnika zakończono na etapie zilustrowanym rysunkiem 13d.

4. Posumowanie

Podczas eksploatacji WMP dochodzi do różnego rodzaju uszkodzeń turbin. Wiedzy o ich stanie mogą dostarczyć między innymi badania wizualne, co o tyle jest ważne, że wykrycie jakiegokolwiek wady we wczesnym stadium jej rozwoju przy wiarygodnej ocenie tych zmian metodami nieniszczącymi umożliwia w niektórych przypadkach przedłużenie okresu eksploatacji silnika tzw. eksploatacja nadzorowana, lub wycofać silnik z eksploatacji zanim dojdzie do bardziej złożonych, a przez to i kosztownych w skutkach uszkodzeń jego turbiny. Ze względu na niewątpliwe zalety, metoda wizualna stając się jedną z podstawowych metod diagnostyki technicznej zwiększa poziom bezpieczeństwa eksploatacji statków powietrznych. Ważne jest również, aby wykonujący badania personel posiadał niezbędne kwalifikacje, doświadczenie i wiedzę, co do sposobu ich przeprowadzania jak i umiejętności w posługiwaniu się sprzętem o odpowiedniej jakości i przeznaczeniu, redukując przez to błędy tzw. „czynnika ludzkiego” w procesie badawczym.

5. Literatura

- [1] Biuletyn eksploatacyjny S/5070/E/2008, dotyczący zwiększenia resursu międzyremontowego i realizacji okresowych sprawdzeń silników RD-33
- [2] Szczepankowski A., Szymczak J.: Wpływ zapyłonego otoczenia na charakterystyki i parametry pracy lotniczych silników spalinowych, 40 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Warszawa 2011;
- [3] Szymczak J., Szczepankowski A.: Badania endoskopowe w ocenie degradacji elementów wewnętrznych wirnikowych maszyn przepływowych, X Jubileuszowy Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych, Stare Jabłonki 2005;
- [4] Szymczak J., Szczepankowski A., Olzak B.: Gasaeus erosion and corrosion of turbines, V Internacional Scientific - Technical Conference, Gdansk - Stockholm - Tumba 2007;

- [5] Szczepankowski A., Szymczak J., Spychała J.: Operating degradations of air turbine scoops of turbo-engines” (w:) “Solid state phenomena”, V. 147 ÷ 149, Zurich 2009;
- [6] Kulaszka A., Chalimoniuk M., Błachnio J.: Types of damages to turbines of aircraft turbine engines and possibility of diagnosing them. VII International Scientific-Technical Conference „Explo-Diesel and Gas Turbine”, Gdańsk - Kobenhavn (Danmark), 2009;
- [7] Baza danych Zakładu Silników Lotniczych ITWL (niepublikowana).



Mgr inż. Adam Bagiński – Szef Szefostwa Techniki Lotniczej, Główny Inżynier Wojsk Lotniczych



Dr inż. Andrzej Szczepankowski – Adiunkt w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych



Dr inż. Janusz Szymczak – Starszy specjalista w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych



Mgr inż. Artur Kulaszka – kierownik Laboratorium Badania Stanu Technicznego Wirnikowych Maszyn Przepływowych