

EKSPERTYZA TECHNICZNA

**wykonana na zlecenie Państwowej Komisji Badania Wypadków Lotniczych
dotycząca uszkodzenia silników typu PW 2040 zabudowanych na samolocie
B757 eksploatowanego przez firmę FISHER AIR**

Przedmiot ekspertyzy:

Przedmiotem ekspertyzy są uszkodzenia piór łopatek wirnikowych IV stopnia sprężarki (I stopnia WWC sprężarki) silników typu PW 2040 o nr 716313 oraz 727143 zabudowanych na samolocie B757 o znakach SP-FVP eksploatowanego przez firmę FISHER AIR, które powstały podczas startu samolotu z lotniska Warszawa-Okęcie w dniu 31 grudnia 2005 r.

Cel działań:

Celem ekspertyzy jest określenie okoliczności i mechanizmu powstania uszkodzeń łopatek wirnikowych IV stopnia sprężarki (I stopnia WWC sprężarki).

Zakres przeprowadzonych czynności:

W pierwszej fazie badań zapoznano się z materiałami przesłanymi przez firmę remontującą silniki po ich uszkodzeniu - MTU Maintenance w Hanowerze.

Wstępne wnioski z analizy dostarczonych materiałów przez MTU zaprezentowano na spotkaniu w siedzibie firmy FISHER AIR w obecności przedstawicieli P.P. „Porty Lotnicze”.

Pozyskano dane z rejestratora parametrów pracy obu silników oraz zapis rozmów prowadzonych przez załogę samolotu z kontrolerami ruchu na lotnisku Okęcie.

W związku z odmienną interpretacją przyczyn uszkodzeń łopatek IV stopnia sprężarki ww. silników i wobec konkluzji prezentowanych przez MTU Maintenance w kolejnym etapie badania zorganizowano spotkanie w MTU Maintenance celem omówienia rozbieżności dotyczących przyczyn powstania tych uszkodzeń oraz osobistego oglądu uszkodzonych detali. W czasie spotkania z przedstawicielami MTU Maintenance dokonano w szczególności szczegółowego oglądu uszkodzonych łopatek VI stopnia sprężarek obu silników oraz przedyskutowano interpretację zdarzeń i ich przyczyn.

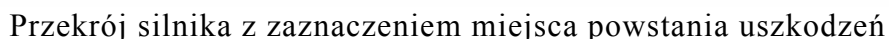
W ostatnim etapie zestawiono wszystkie uzyskane informacje i poddano je analizie oraz wyciągnięto wnioski z przeprowadzonych dyskusji.

Omówienie dokonanych ustaleń:

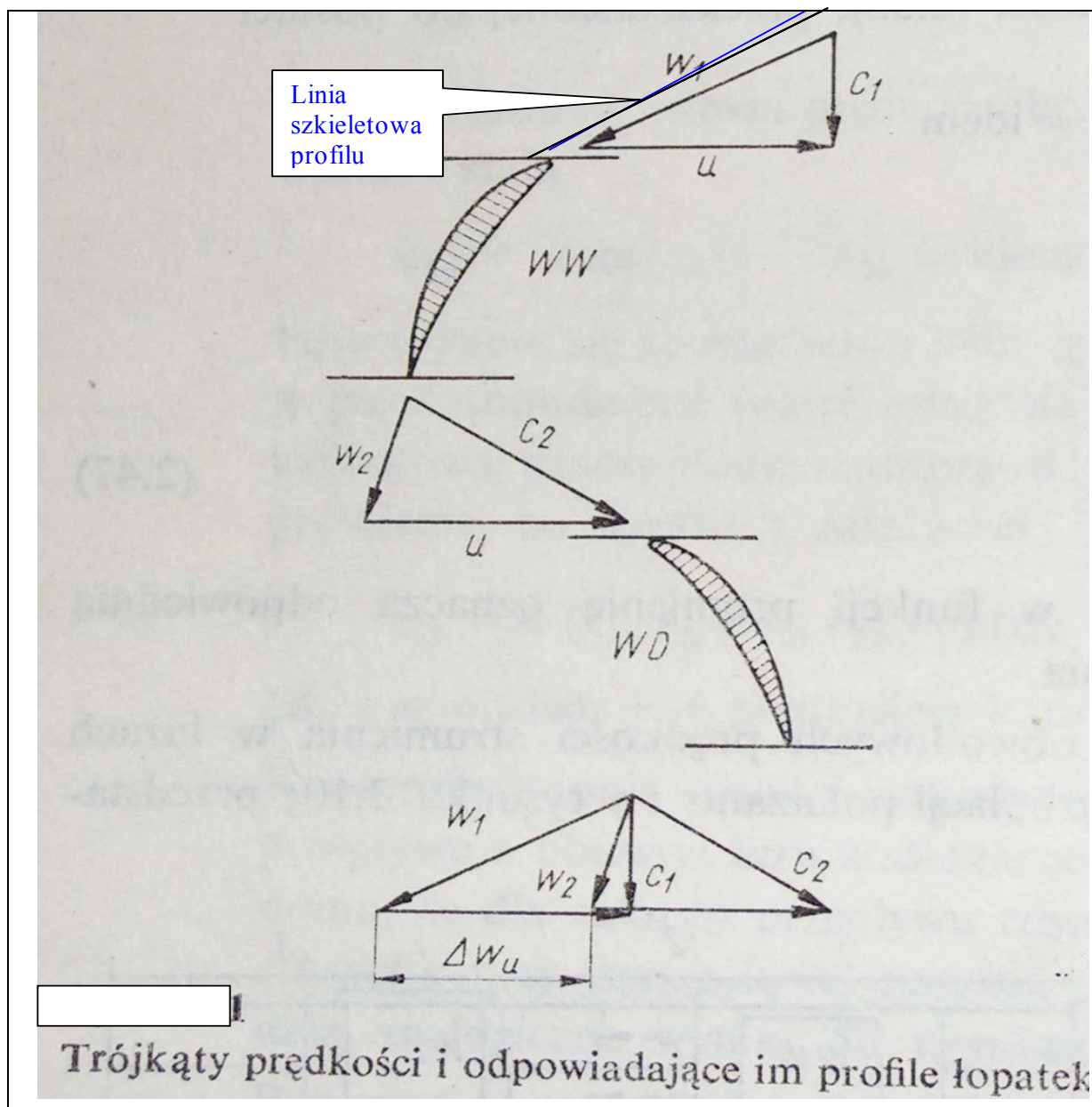
Opis uszkodzeń obu silników dokonany w Raporcie z badań o nr QM-No.:0618 wykonanym przez MTU Maintenance podczas weryfikacji porozbiórkowej obu silników został dokonany prawidłowo, prawidłowym jest także ostateczna konkluzja, że pierwotną przyczyną uszkodzenia łopatek VI stopnia wirnikowego było

Należy jednak zwrócić uwagę, że w Raporcie tym brak jest omówienia mechanizmu powstawania uszkodzeń łopatek VI stopnia sprężarki oraz jednoznacznego wskazania (udokumentowania) śladów świadczących o zderzeniach łopatek wirnikowych VI stopnia sprężarki z ciałem obcym o charakterze miękkim. Wątpliwości budzi też przyjęcie przez MTU założenia, że uszkodzenia powstały przy prędkości samolotu 50 knots (ok. 80 km/h).

Silnik typu PW 2040 jest dwuprzepływowym, trójwałowym silnikiem turbinowym, w którym siła ciągu jest w stopniu zasadniczym wytwarzana przez wentylator powietrza, który równocześnie przepompowuje większość powietrza zasysanego przez wlot silnika. Pozostała część powietrza zasysana jest do sprężarki niskiego ciśnienia (WNC), a następnie wysokiego (WWC) i zużywana w tzw. wytwornicy jaką stanowi pozostała część silnika. Należy zwrócić uwagę, że silnik ten charakteryzuje się znaczną różnicą prędkości obrotowych wentylatora względem WNC i WWC wobec WWC.



Należy zauważyć, że komora ta powoduje zmianę parametrów przepływu powietrza wobec standardowego rozwiązania, w którym palisady profilów stopnia wirnikowego następują bezpośrednio po palisadzie łopatek stopnia kierowniczego i na odwrót (patrz rys.1).

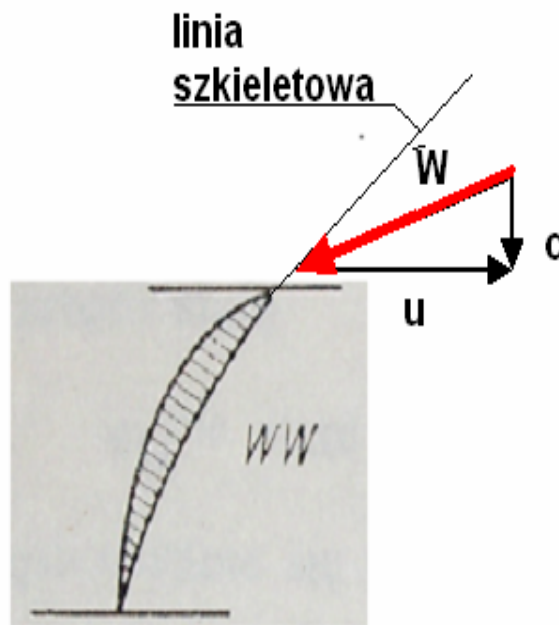


Rys.1. Zobrazowanie wektorowe tzw. trójkąty prędkości opisujące przepływ powietrza w sprężarce, w której łopatki wirnikowe znajdują się w zasięgu oddziaływania wstępnego zawirowania strumienia wytwarzanego przez łopatki kierownic i na odwrót.

W takiej standardowej relacji wypadkowy wektor prędkości przepływu w profilu łopatek stopnia kierowniczego nadaje strumieniowi powietrza wstępne zawirowanie (wektor c_1) w stronę obrotu wirnika, wektor ten po złożeniu z wektorem obwodowym obrotu stopnia wirnikowego (wektor u) powoduje, że wypadkowy wektor prędkości względnej czynnika roboczego wchodzącego w profile palisady wirnika (w_1) jest styczny do linii szkieletowej profilu łopatek wirnikowych.

W przypadku silnika PW2040 w pierścieniowej komorze wyrównawczej bezpośrednie oddziaływanie palisady kierownic pomiędzy ostatnim stopniem WNC, a I stopniem WWC (VI stopień wirnikowy) będzie ulegał zanikowi wraz z drogą przebywaną przez powietrze wzdłuż przekroju tej komory. Tak więc linia szkieletowa łopatek VI stopnia jest ustawiona tak jak dla łopatek I stopnia sprężarki (napływ powietrza bez zawirowania wstępnego).

Rozpatrując przypadek, gdy w strumieniu przepływającego powietrza pojawi się ciało obce o gęstości (masie) większej niż powietrze, w wyniku oddziaływania sił bezwładności oraz braku oddziaływania palisad łopatek wirnikowych i kierowniczych, jego prędkość i kierunek c_{co} ulegać będą znaczącym zmianom względem unoszącego je powietrza. Zmiana kierunku i wielkości wektora c_{co} opisującego ruch ciała obcego wchodzącego na łopatki wirnikowe VI stopnia spowoduje zmianę wektora prędkości względnej (w_{co}), a w konsekwencji utratę styczności kierunku przemieszczania się tego ciała z linią szkieletową profilu łopatek wirnikowych VI stopnia sprężarki (patrz rys.), co w efekcie doprowadzi do wysokoenergetycznego zderzenia ciała obcego z piórem łopatki.



Rys.2 Zobrazowanie wpływu zmiany kierunku i wielkości wektora c_{co} opisującego ruch ciała obcego wchodzącego na łopatki wirnikowe powodujące zmianę wektora prędkości względnej (w_{co}), a w konsekwencji utratę styczności kierunku przemieszczania się tego ciała z linią szkieletową profilu łopatek.

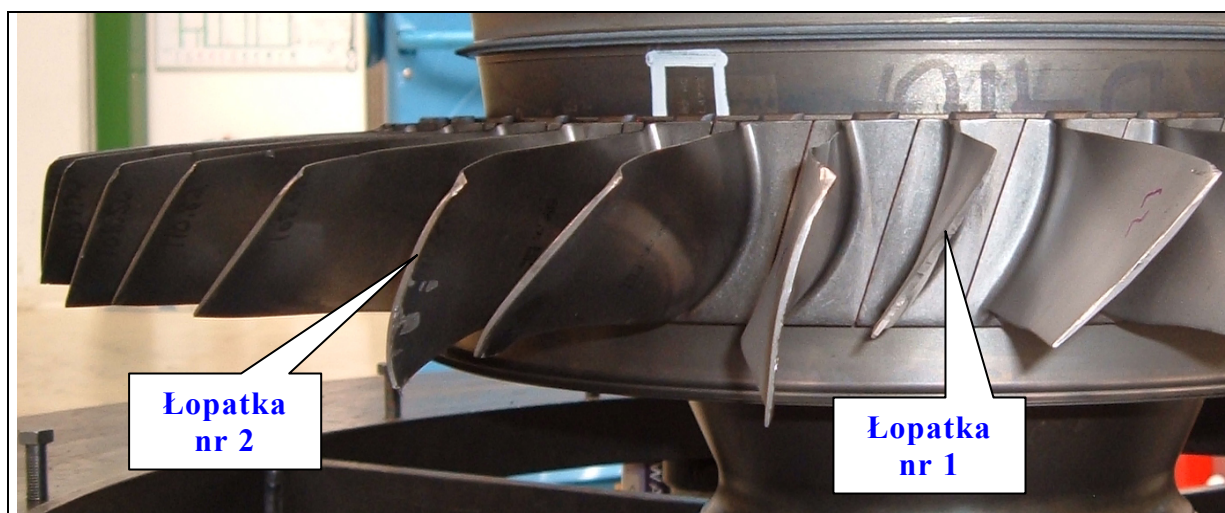
Powyższe rozważania umożliwiają równocześnie wyjaśnić przyczyny braku uszkodzeń łopatek sprężarkowych WNC. W przypadku łopatek wentylatorowych, brak uszkodzeń wynika zasadniczo z tego, że są one przystosowane na przyjęcie dodatkowych obciążeń od ciał obcych zasysanych do wlotu. W przypadku łopatek WNC, dzięki bezpośredniemu następowaniu po sobie palisad łopatek stopnia wirnikowych i kierowniczych nie nastąpiła utrata styczności kierunku przemieszczania się ciała obcego z linią szkieletową profili łopatek w stopniu, który mógł spowodować powstanie uszkodzeń.

Charakterystyka uszkodzeń łopatek VI stopnia sprężarki i ich analiza

Ponieważ na łopatkach z wyłamanym charakterystycznej wysokości 3/4 pióra stwierdzono złom o charakterze doraźnym świadczący o wysokoenergetycznym zderzeniu pióra łopatki w jego części wierzchołkowej z ciałem obcym, uznano opis tego uszkodzenia w Raporcie MTU Maintenance jako wystarczający.

Kwestią niewystarczająco omówioną w ww. Raporcie pozostaje opis uszkodzeń piór łopatek poprzedzających łopatkę złamaną, które dzięki istniejącym na tych piórach śladom i odkształceniom wnoszą najwięcej informacji o mechanizmie zdarzenia.

Uszkodzenia łopatek wirnikowych VI stopnia na obu silnikach powstawały w identycznej sekwencji - patrz zdjęcie 3. Łopatkę urwaną, 3/4 wysokości, jest poprzedzona łopatką uszkodzoną w niewielkim stopniu (najprawdopodobniej posiada ona tzw. uszkodzenia wtórne) i łopatką ją poprzedzającą bez uszkodzeń oraz następną, która doznała znacznych odkształceń pióra. Patrz zdj



Zdj. 1. Uszkodzenia piór łopatek wirnikowych IV stopnia sprężarki (I stopnia WWC sprężarki) silnika typu PW 2040 o nr 716313.

Taka sekwencja rozkładu uszkodzeń świadczy to o tym, że wielkość i ilość kropli wody była ograniczona, co wynika z faktu, że w przestrzeni przed VI stopniem sprężarki temperatura w czasie pracy silnika z obrotami WWC 90% obrotów maksymalnych wynosi ok.150 °C, a prędkość przepływu w poprzedzającej części kanału gazodynamicznego wynosi ok.100-120 m/s. W warunkach tych następowało gwałtowne odparowywanie i zmniejszanie się rozmiarów kropli wody.

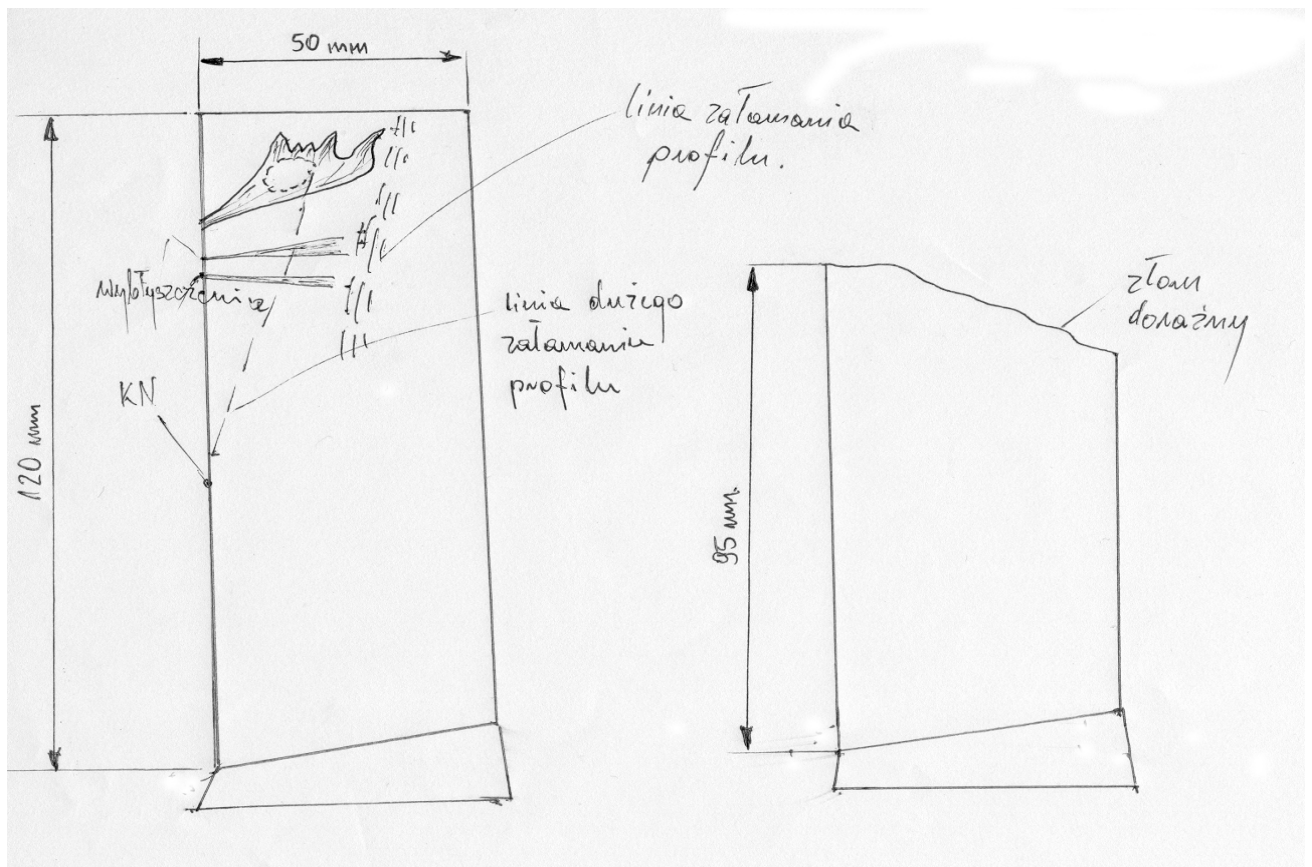
Dla pełni obrazu podjęto próbę szacunkowego określenia masy kropli wody, która uderzyła w pióro łopatki łopatkę oznaczoną jako 2.

W wyniku oglądu pióra tej łopatki stwierdzono, że pióro wzdłuż całej cięciwy na ok. 3/4 wysokości pióra uległo odkształceniu w kierunku przeciwnym do ruchu wirnika. Największy wymiar odkształcenia to posiada od strony krawędzi natarcia, a swój początek ma na KN 68 mm od wierzchołka łopatki, a koniec u wierzchołka w odległości 22 mm od KN (patrząc wzdłuż cięciwy).

Na krawędzi natarcia (KN) w odległości pomiędzy 28 i 30 mm od wierzchołka łopatki stwierdzono ślady (tzw. dymek) charakterystyczne dla zaburzania przepływu na niewielkim uszkodzeniu KN pióra łopatki, jednak mimo wyblyszceń na krawędzi natarcia karbów na KN nie stwierdzono. Po głębszej analizie i obróbce zdjęć należy uznać, że ślad ten powstał w wyniku kontaktu z niewielką kroplą wody, która przemieszczając się od KN wzdłuż cięciwy łopatki (kierunek osiowy) ulegała gwałtownemu odparowywaniu wymywając z środka ścieżki osadzony na łopatkę pył i osadzając go na jej brzegach.

W odległości pomiędzy 21-19 mm od wierzchołka łopatki na jej KN znajduje się początek podobnego, ale szerszego śladu. W odróżnieniu od opisanego wcześniej ślad ten przemieszcza się w kierunku promieniowo-osiowym i rozszerza się ku

wierzchołkowi łopatki, by przyjąć postać nacieku o szerokości 19 mm z postrzępionym zakończeniem w odległości 3-6 mm od wierzchołka łopatki – patrz szkic i zdjęcia .



Szkic obrazujący ślady i odkształcenia łopatki nr 2 wykonany w czasie oglądu rzeczywistego elementu oraz odwzorowanie złamania łopatki nr 1.

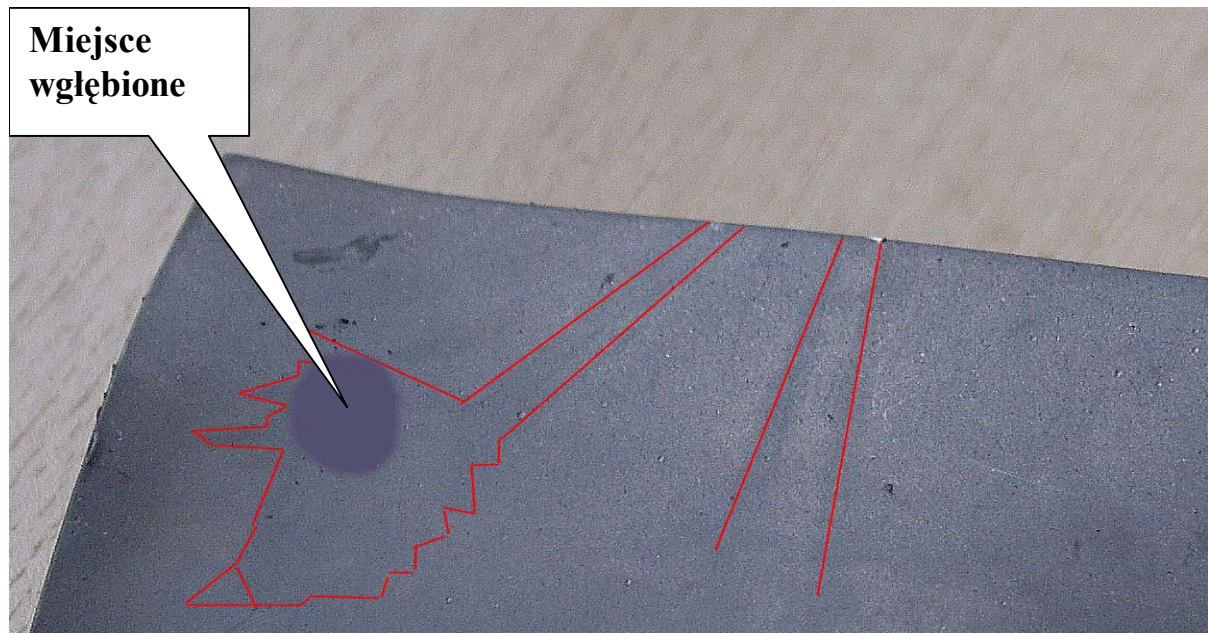


Zdj. 2. Widok śladów nacieków na łopacie nr 2



Zdj 3 Widok śladów nacieków na łopacie nr 2 po obróbce kontrastującej obraz.

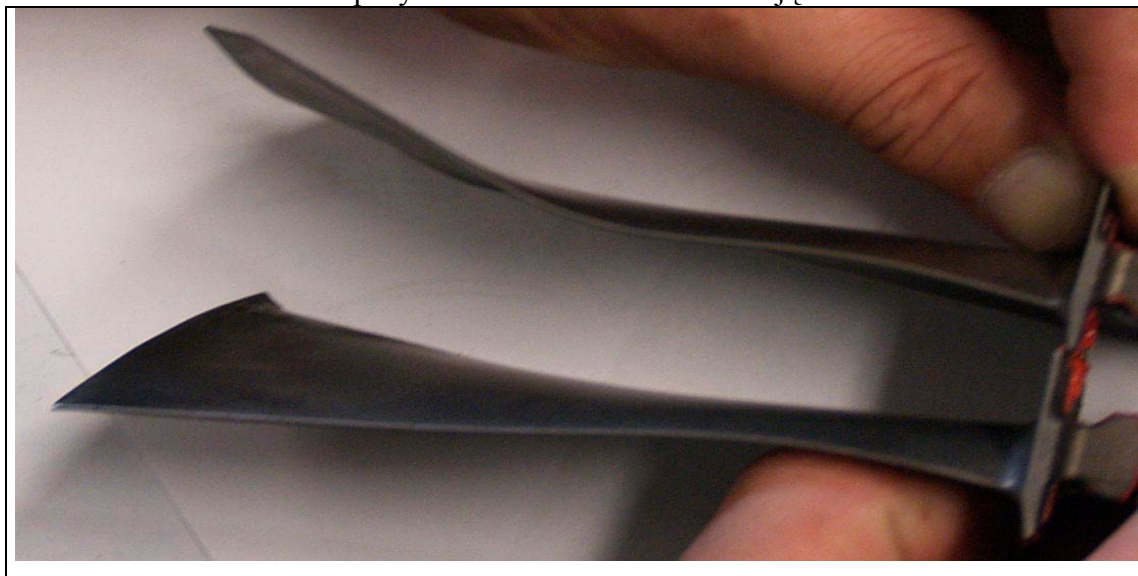
W śladzie tym zidentyfikowano wgłębienie o regularnym sferoidalnym kształcie i średnicy ok. 8-10 mm (trudnym do identyfikacji na podstawie obrazów fotograficznych). Brzegi tego wgłębienia są łagodnie wyprofilowane tak, że jego ostatecznej identyfikacji dokonywano manualnie- patrz zaznaczenie na zdjęciu.



Zdj. 4. Zobrazowanie krawędzi śladów naciekowych na powierzchni koryta łopatki nr 2 oraz wskazanie wgłębienia na piórze tej łopatki.

Z pomiaru wgłębienia na piórze tej łopatki można założyć, że średnica kropli wynosiła ok. 9 mm, a co za tym idzie jej masa to ok. 1 gram. Należy jednak zauważyć, że obciążenie od zderzenia z kroplą było obciążeniem punktowym, ale fakt złamania łopatki nr 1 oraz rozległość uszkodzeń łopatki 2 oraz 3 wskazuje na znacznie bardziej rozległe oddziaływanie zdarzenia na pióra łopatek.

Rozległość powstałych odkształceń nie tłumaczy nawet założenie, że zderzenie nastąpiło w najbardziej wrażliwym miejscu łopatki jakim jest miejsce u jej wierzchołka w pobliżu krawędzi natarcia, w którym to przypadku powstaną największe momenty od sił gnących i skręcających (te ostatnie w obliczeniach konstrukcyjnych łopatek wirnikowych wyższych stopni nie są uwzględniane ponieważ momenty od sił bezwładności i sił aerodynamicznych się kompensują). W takim bowiem przypadku pióro uległo by skręceniu wobec swojej osi sztywności, a więc od strony KN uległo by przemieszczeniu w kierunku przeciwnym do ruchu wirnika, a od strony KS przeciwnie. W przypadku omawianych uszkodzeń pióro zarówno od strony KN jak i KS uległo odkształceniu w kierunku przeciwnym do ruchu wirnika. Patrz na przykładowe odkształcenia zdjęcia nr 5 i 6.





Zdj. 5 i 6. Przykładowe odkształcenia wierzchołków łopatek VI stopnia wirnikowego sprężarki

Aby w pełni wytłumaczyć przyczyny rozległości obserwowanych uszkodzeń na łopatkach 2 i 3, a w szczególności przyczynę złamania piór trzech łopatek na obu silnikach (patrz łopátka 1) zestawiono założenie o uderzeniu kropli o znacznych rozmiarach w najbardziej wrażliwym miejscu łopátki jakim jest miejsce u jej wierzchołka w pobliżu krawędzi natarcia z śladami świadczącymi o ich gwałtownym odparowaniu w zetknięciu z korytami tych łopatek. Uzasadniając ten ostatni czynnik uwzględniano że, krople wody, które dotarły do VI stopnia sprężarki w czasie drogi przez w komorę pierścieniową, niesione były powietrzem o temperaturze 150 °C, stąd założono że, stopień ich podgrzania był bliski temperatury wrzenia wody. W następnym etapie nastąpiło zderzenie się bliskich wrzenia kropeł wody z poruszającymi się z prędkością ok. 0-85-0,9 Ma łopatkami wirnikowymi VI stopnia (o temperaturze 150 °C), co w efekcie wywołało ich odparowanie i powodowało „gwałtowne miejscowe wzrosty gęstości strumienia” zwielokrotniające efekt zderzeń i rozległość odkształceń piór łopatek.

Podsumowując, łopátki wirnikowe VI stopnia sprężarki silników PW 2040 w warunkach atmosferycznych, kiedy może zostać zassane np. błoto pośniegowe stają się „najsłabszym ogniwnem” silnika.

Należy dodać, że typowe objawy i przyczyna omawianych uszkodzeń były znane ekspertowi MTU Maintenance, który wcześniej pracował jako ekspert w firmie Pratt&Whitney - producenta silnika PW 2040, który przytoczył jako przykłady analogiczne fakty z eksploatacji tych silników w warunkach zimowych na Alasce.

Omówienie okoliczności powstania uszkodzeń.

Dla wyjaśnienia okoliczności powstania uszkodzeń silników poddano interpretacji dane z rejestratora pracy silników. Zapisy te były dokonywane z interwałem czasowym 1 sekundy, ale na podstawie zarejestrowanych parametrów nie można wskazać precyzyjnie sekundy, w której łopátki uległy złamaniu.

Podstawowym parametrem, który winien być wskaźnikiem takiego zdarzenia są pomiary drgań. Mimo przeanalizowania całej rejestracji (od uruchomienia do

wyłączenia silników) żaden z dwóch czujników drganiowych na każdym z silników nie wskazał symptomów podwyższonego poziomu drgań, czy też wzbudzeń drganiowych. Jedynym symptomem uszkodzenia silnika lewego było zmniejszenie reakcji silnika na próbę akceleracji wykonaną przez pilota po przerwaniu startu między 9:24:58, a 9:24:05, po której to próbie zgłoszono Wieży Kontroli Ruchu konieczność skołowania z pasa startowego.

W związku z tym, że wcześniej oba silniki reagowały na ruchy dźwigni sterowania jednakowo, należy uznać, że uszkodzenie powstało w czasie od momentu, w którym podjęto decyzję o starcie do momentu, gdy podjęto decyzję o redukcji obrotów obu silników. Poniżej zaprezentowano szczegółowy opis pracy silników w tym czasie.

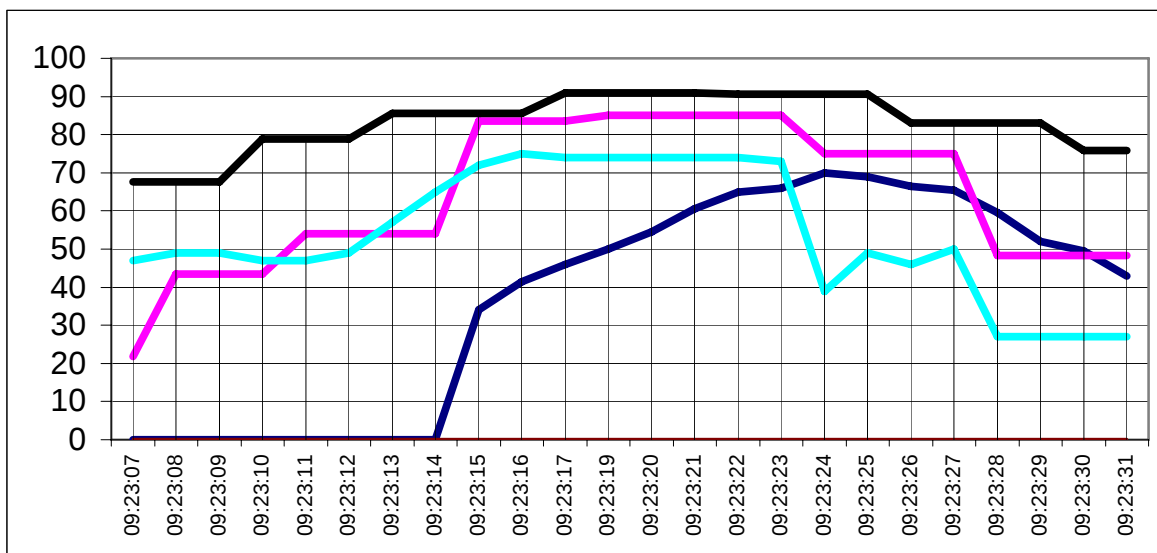
Start samolotu został rozpoczęty o 9:23:12, kiedy to rozpoczęto przesuwanie dźwigni sterowania silnikami przy zahamowanych kołach podwozia, które zwolniono o 9:23:14 osiągając w tym czasie obroty WNC 54 %, a obroty WWC 85,62 % ($V_{\text{samolotu}} = 0$). O starcie samolotu z zahamowanych kół świadczy też, wzrost prędkości samolotu o 34 knots w przeciągu 2 sekund (9:23:14 i 15). Kontynuację przesuwania dźwigni do pozycji 75 stopni zakończono o 9:23:16 uzyskując o 9:23:19 obroty ustalone WNC 85 % i WWC 91 % oraz prędkość samolotu $V_{\text{samolotu}} = 50$ knots.

Dźwignie sterowania silnikami pozostawały w pozycji 75 stopni do 9:23:23.

Tabela 1 . Wybrane parametry pracy silnika nr 716313 w czasie od podjęcia decyzji o rozpoczęciu startu do momentu jego przerwania.

Czas	Prędkość s-tu	Obroty WNC %	Obroty WWC %	Kąt ust. dźwigni sterowania silnikiem	Opis
09:23:07	0.0	21,75	67,62	47	Kołowanie na pozycję startu
09:23:08	0.0	43,50	67,62	49	
09:23:09	0.0	43,50	67,62	49	
09:23:10	0.0+H	43,50	78,88	47	Zahamowanie samolotu
09:23:11	0.0+H	54,00	78,88	47	
09:23:12	0.0+H	54,00	78,88	49	Zwiększenie obrotów silnika
09:23:13	0.0+H	54,00	85,62	57	
09:23:14	0.0	54,00	85,62	65	Odhamowanie i dalsze zwiększanie obrotów silnika
09:23:15	34	83,50	85,62	72	
09:23:16	41,5	83,50	85,62	75	
09:23:17	46	83,50	91,00	74	
09:23:19	50	85,00	91,00	74	Osiągnięcie planowanych parametrów pracy silnika do startu
09:23:20	54,5	85,00	91,00	74	
09:23:21	60,5	85,00	91,00	74	
09:23:22	65	85,00	90,62	74	
09:23:23	66	85,00	90,62	73	Zmniejszenie obrotów silnika
09:23:24	70	75,00	90,62	39	Osiągnięcie maksimum prędkości samolotu
09:23:25	69	75,00	90,62	49	
09:23:26	66,5	75,00	83,12	46	
09:23:27	65,5	75,00	83,12	50	Zmniejszenie obrotów silnika do obrotów biegu jałowego
09:23:28	59,5	48,25	83,12	27	
09:23:29	52	48,25	83,12	27	
09:23:30	49,5	48,25	75,88	27	
09:23:31	43	48,25	75,88	27	

Wykres obrazujący zapis z tabeli nr 1 .



Należy zaznaczyć, że rejestracja rozmów z Wieżą Kontroli Ruchu nie wnosi do omawianej tej kwestii nic ponad informacje z pokładowego rejestratora parametrów silnika.

Podsumowanie:

Przyczyną złamania piór trzech łopatek wirnikowych VI stopnia było zderzenie z prędkością ok. 0-85-0,9 Ma ich części wierzchołkowej w pobliżu krawędzi natarcia z kroplami bliskiej wrzenia wody. Woda ta w zetknięciu z piórami tych łopatek odparowała wywołując „gwałtowne miejscowe wzrosty gęstości strumienia”, co doprowadziło do przekroczenia naprężeń krytycznych w $\frac{3}{4}$ wysokości pióra i ich złamania.

Łopatki wirnikowe VI stopnia sprężarki silników PW 2040 w warunkach, kiedy może zostać zassane np. błoto pośniegowe stają się „najsłabszym ogniwem maszyny”. Fakt ten jest znany w praktyce eksploatacyjnej tych silników w związku z tym procedura zapobiegania takim zdarzeniom powinna być (lub zostać) opisana w Instrukcji Eksploatacyjnej Silników, Samolotu oraz Instrukcji Operacyjnej Operatora.

mgr inż. Arkadiusz Gawin