

Bartosz PRZYBYŁA¹
Zbigniew ZAPALOWICZ²

USZKODZENIA SPRĘŻARKI ODŚRODKOWEJ SILNIKA LOTNICZEGO P&W 206 b2 SPOWODOWANE ZASSANIEM CIAŁ OBCYCH

W artykule przedstawiono najczęściej występujące uszkodzenia sprężarek odśrodkowych silników P&W 206b2 zamontowanych w śmigłowcach EC-135, eksploatowanych przez Lotnicze Pogotowie Ratunkowe. Uszkodzenia te są następstwem pracy tych silników w pasie nadmorskim, lądowaniami na podłożu piaszczystym np. plaży i zassaniem przez nie ciał obcych, takich jak m.in.: piasek, kurz, kropelki wody. Zanieczyszczenia występujące w zasysanym powietrzu powodują zmiany parametrów eksploatacyjnych silnika. Z kolei na ich podstawie można ocenić stan techniczny eksploatowanego silnika. W pracy omówiono także metodę oceny uszkodzeń elementów sprężarki oraz podano sposób ich naprawy.

Słowa kluczowe: silnik lotniczy, sprężarka odśrodkowa, uszkodzenia sprężarki

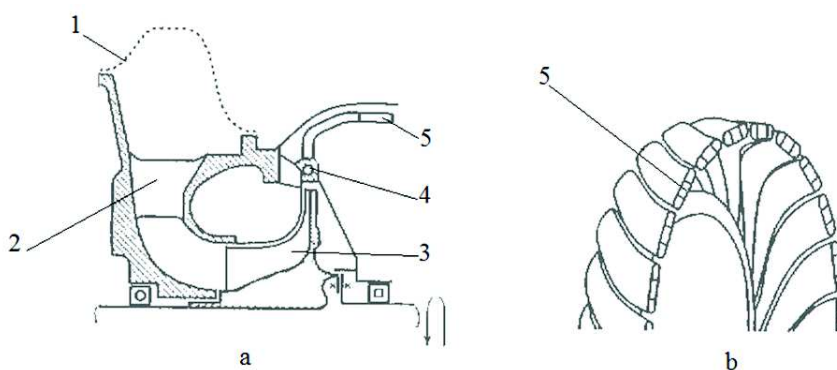
1. Wstęp

Sprężarka odśrodkowa jest zasadniczym elementem silnika lotniczego zamontowanym, na wspólnym wale, między wlotem a turbiną gazową. Zadaniem sprężarki jest dostarczyć, w sposób ciągły i nieprzerwany, odpowiednią ilość powietrza do komory spalania oraz powietrza do napędu agregatów połączonych na stałe z przekładnią redukcyjną. Ponadto sprężarka powinna dostarczyć odpowiednią ilość powietrza chłodzącego w celu obniżenia temperatury gorących elementów silnika oraz powietrza służącego do uszczelnienia miejsca wyjścia wału napędowego silnika. Sprężarka zapewnia także powietrze dające sygnał sterujący dla modułu zasilania paliwem FMM (Fuel Management Module). Sprężarka powinna również zasilać kabinę załogi w świeże powietrze - układ wentylacji. Wymagania, jakie stawia się sprężarkom są, więc następujące: wytworzyć odpowiedni spręż i natężenie przepływu, charakteryzować się wysoką

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Bartosz Przybyła, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, al. Piastów 19, 70-310 Szczecin, Tel. 91 449 42 72, e-mail: bartosz.przybyla@zut.edu.pl

² Zbigniew Zapalowicz, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, e-mail: zbigniew.zapalowicz@zut.edu.pl

sprawnością przez cały okres eksploatacji silnika (około 80% - 90%), wykazywać się ciągłą, nieprzerwaną oraz stateczną pracą, posiadać odporność na wysokie obroty silnika. Sprężarka silnika P&W 206b2 jest jednostopniową sprężarką odśrodkową (rys. 1), jej spręż wynosi $\Pi_s^* = 8,2$, strumień masy powietrza, jaki zasysa silnik jest równy $\dot{m} = 2,035$ kg/s, a obroty nominalne wału wynoszą $n = 58000$ obr/min [1].



Rys.1. Schemat konstrukcyjny sprężarki silnika PW 206b2: 1 - siatka zabezpieczająca wlot, 2 - łopatki wlotowe, 3 - wirnik, 4 - wlot do dyfuzora rurkowego, 5 - wylot dyfuzora rurkowego

Fig. 1. Construction scheme of a compressor of the PW 206b2 engine: 1 - intake protective mesh, 2 - inlet ribs, 3 - rotor, 4 - inlet to the pipes diffuser, 5 - diffuser pipes outlet

Sekcja sprężarki składa się z następujących elementów konstrukcyjnych: wlotu, wirnika i dyfuzora. Zadaniem wlotu jest ukierunkowanie strumienia powietrza napływającego do sprężarki. Wlot wykonany jest ze stopu aluminium. Wyposażono go w 6 podpór, w których poprzez specjalnie wydrążone otwory przepływa olej silnikowy oraz paliwo. Takie rozwiązanie konstrukcyjne chroni wlot do silnika przed oblodzeniem. W podporach znajdują się też szczeliny do odprowadzania powietrza (regulacja upustowa), co pozwala zwiększyć granicę obszaru statecznej pracy sprężarki. Wirnik wykonany jest ze stopu tytanu. Ze względu na wirowanie jest elementem najbardziej narażonym na uszkodzenia spowodowane zasysaniem ciał obcych. W związku z tym jego żywotność jest ograniczona przez ilość cykli pracy sprężarki bądź też przez rodzaj możliwych jej uszkodzeń. Rozbieżny dyfuzor (rys. 2) składa się z elementów spawanych oraz frezowanych, wykonanych ze stopów stali, połączonych z 22 kanałami. Jego zadaniem jest zwiększenie ciśnienia statycznego powietrza na wylocie ze sprężarki kosztem zmniejszenia jego prędkości. Spośród wszystkich elementów składowych silnika turbinowego wirnik sprężarki jest elementem najbardziej narażonym na uszkodzenia. Jednocześnie jego konstrukcja i konstrukcja sprężarki muszą być odpowiednio lekkie, wytrzymałe oraz precyzyjnie wykonane. Na elementy sprężarki działają obciążenia, które są wywołane:

- zginaniem i skręcaniem, pochodzącym od przepływającego strumienia powietrza,
- rozciąganiem łopatek, spowodowanym działaniem siły odśrodkowej,
- drganiem wynikającymi z niewyważenia bądź uszkodzenia wirnika.



Rys. 2. Dyfuzor silnika P&W 206 b2 (fot. P. Rutkowski)

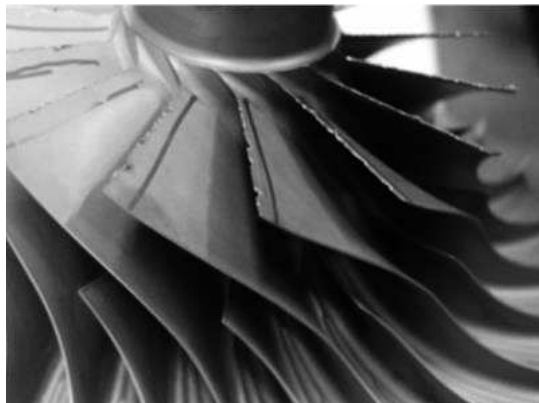
Fig. 2. Diffuser of the P&W 206 b2 engine (photo P. Rutkowski)

2. Rodzaje uszkodzeń elementów sprężarki

Śmigłowce LPR, wykonując misje ratunkowe bądź transportowe, często są narażone na pracę w trudnych warunkach. Stosunkowo krótkie loty, przy jednocześnie dużej ich liczbie, powodują, że silniki, a w szczególności sprężarki, są bardzo mocno narażone na uszkodzenia wywołane oddziaływaniem ciał obcych (rys. 3). Szczególnie lądowania/starty na podłożu piaszczystym (np. podczas lotów ratunkowych w pasie nadmorskim), sprzyjają dostawaniu się do silników drobinek piasku, które przy długotrwałym oddziaływaniu, znacznie przyspieszają proces erozji łopatek wirnika sprężarki. Spośród wszystkich występujących rodzajów uszkodzeń sprężarek, najważniejsze to:

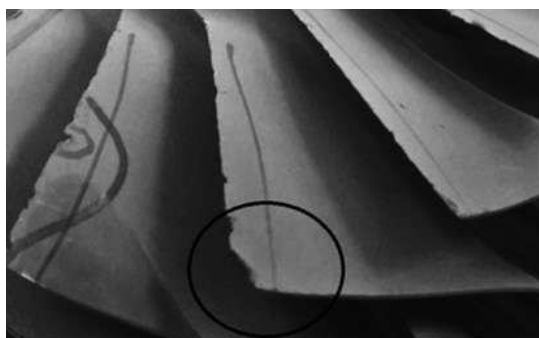
- wyszczerbienia krawędzi natarcia/spływu łopatek (rys. 4),
- wgniecenia krawędzi natarcia/spływu powierzchni łopatek (rys. 5),
- rozerwania łopatek (rys. 6),
- zniekształcenia geometrii łopatki (rys. 7),
- pęknięcia łopatek (rys. 8),
- uszkodzenia erozyjne łopatek - powstające najczęściej pod koniec okresu eksploatacji silników bądź w statkach powietrznych operujących w pobliżu zakładów chemicznych lub w środowisku morskim (rys. 9),
- uszkodzenia erozyjne statora sprężarki (rys. 10).

W związku z tym w trakcie remontów silników lotniczych i likwidacji powstałych uszkodzeń dokonuje się montażu filtrów powietrza, które ograniczają do minimum możliwość dostania się do sprężarki ciał obcych (rys. 11). To powoduje z kolei, że czas eksploatacji silników znacznie się wydłużenia.



Rys. 3. Wirnik sprężarki uszkodzony ciałami obcymi (fot. P. Rutkowski)

Fig. 3. The compressor rotor damaged by foreign objects (photo P. Rutkowski)



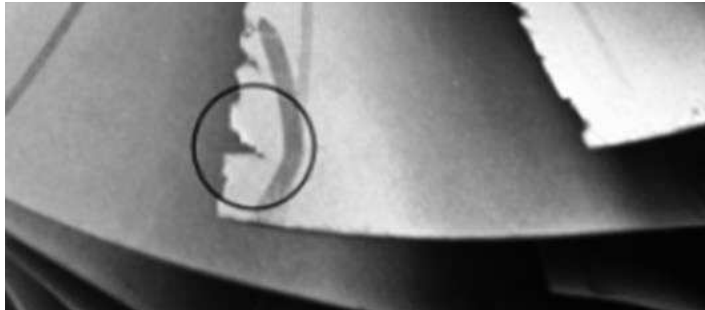
Rys. 4. Wyszczerbienia krawędzi natarcia łopatek wirnika sprężarki (fot. B. Przybyła)

Fig. 4. Nicks in the leading edge of the compressor impeller (photo B. Przybyła)



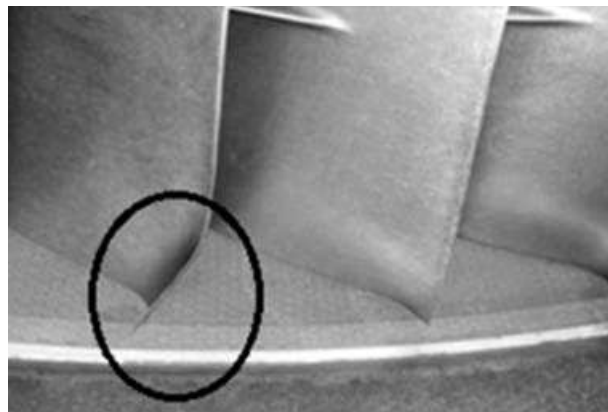
Rys. 5. Wgniecenia krawędzi natarcia wirnika sprężarki (fot. J. Haliniak)

Fig. 5. Dents in the leading edge of the compressor rotor (photo J. Haliniak)



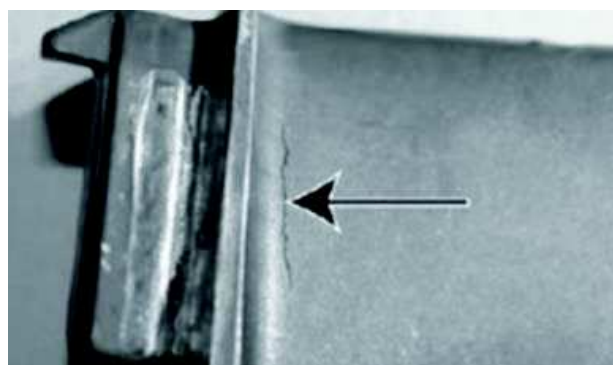
Rys. 6. Rozerwania łopatek wirnika sprężarki (fot. B. Przybyła)

Fig. 6. Tears of the blades of the compressor rotor (photo B. Przybyła)



Rys. 7. Zniekształcenia łopatek wirnika sprężarki [4]

Fig. 7. Distortions of the blades of the compressor rotor [4]



Rys. 8. Pęknięcie łopatki wirnika sprężarki [7]

Fig. 8. Cracks on the blade of the compressor rotor [7]



Rys. 9. Uszkodzenia erozyjne krawędzi łopatek wirnika sprężarki (fot. B. Przybyła)

Fig. 9. Erosion damage of the edges of the rotor blades of the compressor (photo B. Przybyła)



Rys. 10. Uszkodzenia erozyjne statora sprężarki (fot. P. Rutkowski)

Fig. 10. Erosion damage of the compressor stator (photo P. Rutkowski)



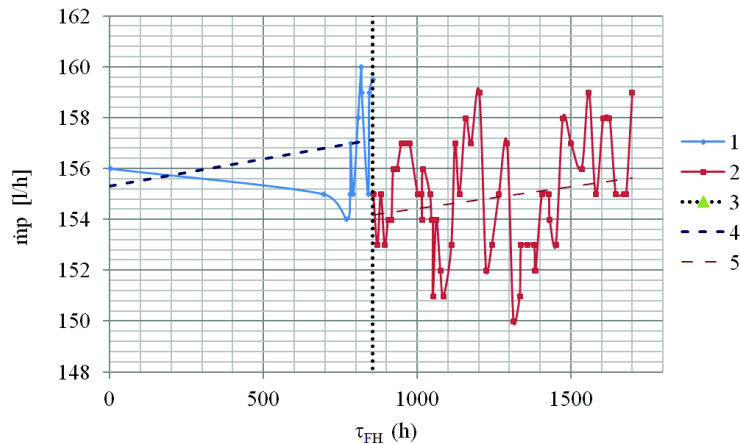
Rys. 11. Filtr powietrza zamontowany w śmigłowcu EC-135 (fot. B. Przybyła)

Fig. 11. Inlet barrier filter mounted on the EC-135 helicopter (photo B. Przybyła)

3. Ocena uszkodzeń oraz naprawa elementów sprężarki

W śmigłowcach EC-135, aby ocenić stan techniczny jednostki napędowej, wykonuje się sprawdzenie pośrednie mocy silnika na ziemi tzw. test „GPC” (Ground Power Check). W trakcie badania mierzy się następujące parametry silnika:

- prędkość obrotową wału wirnika sprężarki - n_1 ,
- prędkość obrotową wału turbiny napędowej - n_2 ,
- temperaturę gazów na wyjściu z turbiny napędzającej sprężarkę - t_{ot} ,
- natężenie przepływu paliwa - \dot{m}_p (rys. 12).



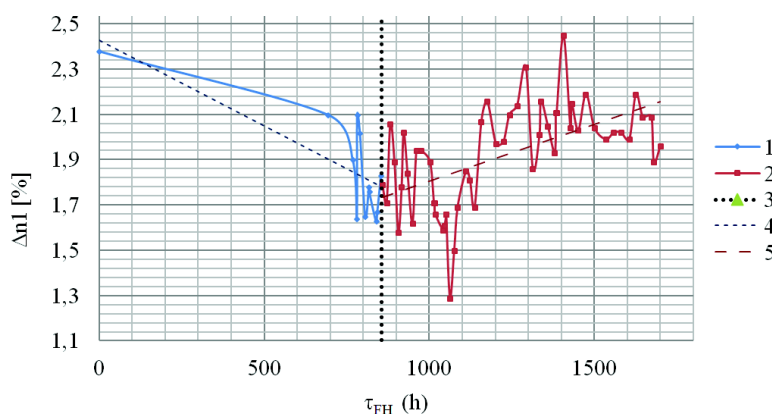
Rys. 12. Zależność natężenia przepływu paliwa \dot{m}_p od czasu eksploatacji silnika τ_{FH} : 1 - przed naprawą silnika i montażem filtrów powietrza, 2 - po naprawie silnika i montażu filtrów powietrza, 3 - czas naprawy silnika i montażu filtrów powietrza, 4 - linia trendu przed naprawą silnika i montażem filtrów powietrza, 5 - linia trendu po naprawie silnika i montażu filtrów powietrza

Fig. 12. Dependence between fuel flow \dot{m}_p and the time of exploration τ_{FH} : 1 - before the repair of the engine and the installation of air filters, 2 - after the repair of the engine and the installation of air filters, 3 — the time of engine repair and the installation of air filters, 4 - trend line before repairing the engine and the installation of air filters, 5 - trend line after the repair of the engine and the installation of air filters

W trakcie eksploatacji silników wartości prędkości obrotowej wału wirnika sprężarki n_1 oraz temperatury gazów na wyjściu z turbiny napędzającej sprężarkę t_{ot} ulegają zmianie. Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów, wyznacza się różnicę pomiędzy maksymalnymi dopuszczalnymi obrotami turbiny napędowej dla danego silnika a obrotami otrzymanymi z badań tj. parametr tzw. „Margin $n_1 - \Delta n_1$ ” (rys. 13). Drugim parametrem na podstawie, którego ocenia się stan jednostki napędowej jest różnicą pomiędzy maksymalną dopuszczalną temperaturą gazów na wyjściu z turbiny sprężarki a temperaturą otrzymaną z pomiarów tzw. „Margin $TOT - \Delta t_{ot}$ ” (rys. 14). Wartości parametrów dopuszczalnych (Δn_1 oraz Δt_{ot}) są podane w dokumentacji technicznej danego silnika turbiny.

Uzyskane w ten sposób dane, pozwalają wstępnie określić stan techniczny głównych podzespołów silnika. Zauważono, że w badanym silniku, przed jego

remontem następuje wzrost obrotów sprężarki n_1 , i temperatury gazów spalinyowych za turbiną sprężarki t_{ot} oraz wzrost natężenia przepływu paliwa \dot{m}_p . Przyczynami takiej zmiany wielkości mierzonych, mogą być: ograniczony dopływ powietrza do silników poprzez np. zatkany wlot, nieszczelność w kanale wlotowym, zanieczyszczony, zerodowany bądź uszkodzony wirnik sprężarki. W miarę eksploatacji silnika, z powodu jednej z wyżej wymienionych przyczyn, do silnika dostaje się mniej powietrza a więc i obroty obu wałów są mniejsze. Komputer sterujący pracą silnika, analizuje jego parametry m.in. prędkość obrotową oraz moment obrotowy na wale napędowym, a następnie zwiększa ilość dostarczanego paliwa do silnika, tym samym zwiększając obroty sprężarki.

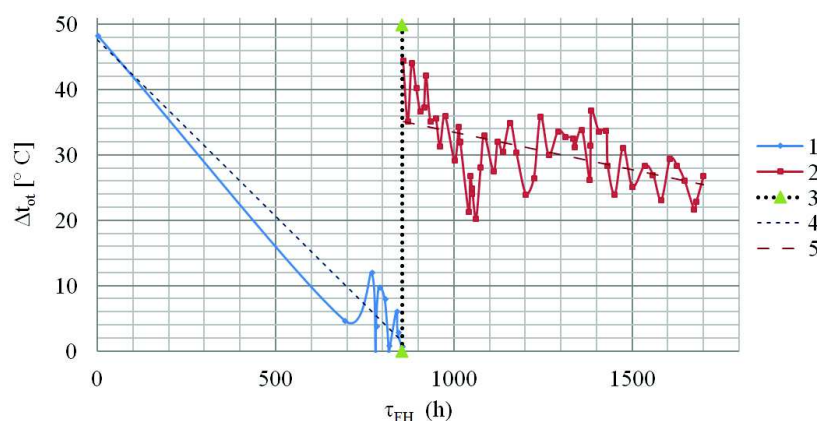


Rys. 13. Zależność parametru Δn_1 od czasu eksploatacji silnika τ_{FH} : 1 - przed naprawą silnika i montażem filtrów powietrza, 2 - po naprawie silnika i montażu filtrów powietrza, 3 - czas naprawy silnika i montażu filtrów powietrza, 4 - linia trendu przed naprawą silnika i montażem filtrów powietrza, 5 - linia trendu po naprawie silnika i montażu filtrów powietrza

Fig. 13. Dependence between the Δn_1 parameter and the time of exploration τ_{FH} : 1 - before the repair of the engine and the installation of air filters, 2 - after the repair of the engine and the installation of air filters, 3 - the time of engine repair and the installation of air filters, 4 - trend line before repairing the engine and the installation of air filters, 5 - trend line after the repair of the engine and the installation of air filters

Po remoncie silnika oraz montażu systemu filtrów powietrza, kiedy to wirnik sprężarki jest chroniony przed uszkodzeniami ciałami obcymi zauważono dalszy wzrost temperatury gazów za turbiną sprężarki t_{ot} oraz wzrost natężenia przepływu paliwa \dot{m}_p , natomiast spadek obrotów sprężarki n_1 . Przyczyną takich zmian parametrów, może być uszkodzenie statora bądź wirnika turbiny napędzającej sprężarkę, pogorszenie się stanu technicznego części gorącej silnika tj. komory spalania lub wtryskiwaczy paliwa, oraz zużycie lub uszkodzenie okładzin uszczelniających wał turbiny. Turbina ma wtedy mniejszą sprawność, a więc wytwarza mniejszy moment obrotowy niż ten niezbędny. Żeby ten spadek mocy

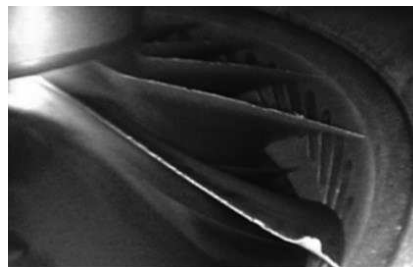
zrekompensować, do silnika dostarczana jest większa ilość paliwa, a to z kolei powoduje wzrost temperatury gazów spalinowych za turbiną napędową sprężarki.



Rys. 14. Zależność parametru Δt_{tot} od czasu eksploatacji silnika τ_{FH} : 1 - przed naprawą silnika i montażem filtrów powietrza, 2 - po naprawie silnika i montażu filtrów powietrza, 3 - czas naprawy silnika i montażu filtrów powietrza, 4 - linia trendu przed naprawą silnika i montażem filtrów powietrza, 5 - linia trendu po naprawie silnika i montażu filtrów powietrza

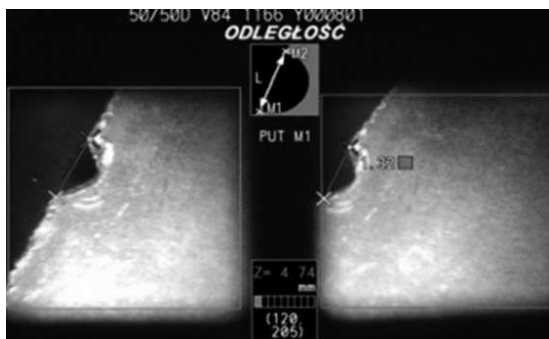
Fig. 14. Dependence between the Δt_{tot} parameter and the time of exploration τ_{FH} : 1 - before the repair of the engine and the installation of air filters, 2 - after the repair of the engine and the installation of air filters, 3 - the time of engine repair and the installation of air filters, 4 - trend line before repairing the engine and the installation of air filters, 5 - trend line after the repair of the engine and the installation of air filters

Do oceny stanu technicznego silnika wykorzystuje się też nieinwazyjną technikę diagnostyczną zwaną boroskopią. Boroskopia polega na wprowadzeniu światłowodu do wnętrza silnika, poprzez odpowiednie kanały oraz inspekcji badanego podzespołu (rys. 15), a w przypadku stwierdzenia jego uszkodzenia do pomiaru wielkości uszkodzenia (rys. 16).



Rys. 15. Widok wnętrza sprężarki podczas boroskopii (fot. J. Haliniak)

Fig. 15. View of the compressor during boroscopy (photo J. Haliniak)

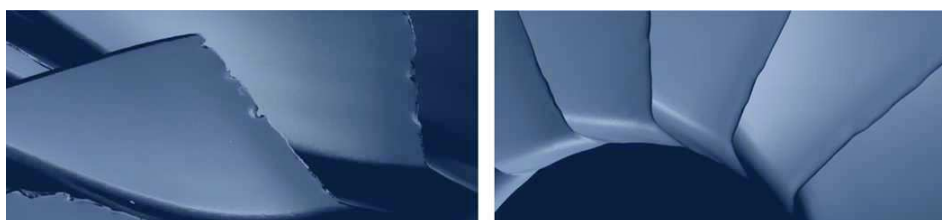


Rys. 16. Pomiar wielkości uszkodzenia wirnika sprężarki (fot. J. Haliniak)

Fig. 16. Measurement of damage to the compressor rotor (photo J. Haliniak)

4. Naprawa uszkodzeń sprężarki

Wykryte podczas boroskopii uszkodzenia wirnika sprężarki, nie zawsze dyskwalifikują silnik z dalszej jego eksploatacji. Wyłączenie silnika z eksploatacji jest uzależnione od stwierdzonego stopnia uszkodzenia tego elementu. Producent będąc świadomym degradacji łopatek sprężarki podczas jej użytkowania zamieścił w instrukcji obsługi silnika, dopuszczalne wartości graniczne parametrów geometrycznych oraz podał zakres koniecznych napraw. Proponowane przez producenta naprawy krawędzi łopatek wirnika sprężarki można dokonywać przy zabudowanej jednostce napędowej, bez jej demontażu. Do tego celu stosuje się specjalne szlifierki elektryczne z giętym walcem oraz zestawem kamieni szlifierskich lub zestawy do szlifowania manualnego. Proces ten ma na celu zlikwidowanie bądź zminimalizowanie naprężeń w łopatkach oraz poprawę przepływu powietrza. Uszkodzenia szlifuje się, nadając im odpowiedni promień oraz wygładza się ostre krawędzie (rys. 17). Po wykonaniu naprawy (rys. 18) parametry silnika są przywrócone. Naprawa elementów sprężarki pozwala uniknąć jej całkowitego zniszczenia.



Rys.17. Widok uszkodzonych krawędzi natarcia łopatek sprężarki przed i po naprawie

Fig. 17. View of the damaged leading edge of the rotor blades of the compressor before and after the repair



Rys. 18. Wirnik sprężarki po remoncie (fot. P. Rutkowski).

Fig. 18. Compressor rotor after the repair (photo P. Rutkowski)

5. Podsumowanie

Określenie stanu technicznego wirnika sprężarki ma istotny wpływ na dalszą eksploatację silnika lotniczego P&W 206 b2. Uszkodzenia łopatek wirnika sprężarki nie zawsze wykluczają ten silnik z dalszego użytkowania. Jednak wykonanie zalecanych prac naprawczych znacząco wydłuża jego okres użytkowania i bezpośrednio wpływa na obniżenie kosztów eksploatacji. Umiejętność oceny stanu technicznego silnika na podstawie wyników testu naziemnego pozwala na szybsze zdiagnozowanie ewentualnych uszkodzeń oraz podjęcie dalszych szczegółowych działań sprawdzających poszczególnych elementów sprężarki. Naprawa układu łopatkowego sprężarki pozwala przywrócić początkowego parametry pracy silnika, co wpływa istotnie na obniżenie kosztów użytkowania śmigłowca.

Acknowledgement

The research leading to these results has received funding from the People Programme (Marie Curie International Research Staff Exchange) of the European Union's Seventh Framework Programme FP7/2007-2013/ under REA grant agreement n° PIRSES-GA-2013-610547.

Literatura

- [1] Balicki W.: Lotnicze silniki turbinowe, Wydawnictwa Naukowe Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2010.
- [2] Dzierżanowski P.: Napędy lotnicze. Turbinowe silniki odrzutowe. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1983.
- [3] Tuliszcza E.: Turbiny ciepłe: zagadnienia termodynamiczne i przepływowe, WNT, Warszawa 1973.
- [4] www.flightsafetyaustralia.com, data dostępu 10.02.2016.
- [5] www.gasturb.de, data dostępu 10.02.2016.

[6] www.mtu.de, data dostępu 12.02.2016.

[7] www.tc.gc.ca, data dostępu 23.01.2016.

DAMAGE OF A CENTRIFUGAL COMPRESSOR OF P&W 206 b2 AIRCRAFT ENGINE CAUSED BY FOREIGN OBJECTS

S u m m a r y

This paper presents the most common damage of the compressor of P&W 206b2 centrifugal engines mounted in helicopters EC-135, operated by Polish Medical Air Rescue. This damage is the result of the work of these engines in a seaside lane, landings on the beach and sucking foreign objects, such as: sand, dust, water droplets etc. Impurities in the intake air cause the changes of operating parameters of an engine. In turn, on this basis, the technical conditions of an engine can be evaluated. This paper discusses the method of assessing the damage to compressor components and provides a way to repair them.

Keywords: aircraft engine, centrifugal compressor, compressor damage

DOI: 10.7862/rm.2016.12

Otrzymano/received: 19.03.2016 r.

Zaakceptowano/accepted: 21.05.2016 r.