

Analiza uszkodzeń eksploatacyjnych oraz ich wpływ na pracę powierzchni kontaktowych w stopniu sprężarki osiowej

Analysis of operational damage and their impact on the work of the contact surfaces in the axial compressor stage

ADAM KOZAKIEWICZ
OLGA GRZEJSZCZAK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.70>

W trakcie eksploatacji elementy wirujące lotniczych silników turbinowych są narażone na liczne uszkodzenia, wynikające z trudnych warunków pracy tych podzespołów. W artykule przedstawiono przykładowe awarie silników lotniczych, spowodowane uszkodzeniami elementów sprężarki. Przeanalizowano wpływ wybranych uszkodzeń w obszarze pióra łopatki na pracę powierzchni kontaktowych w części wieńcowej tarczy i zamka łopatki oraz wyznaczono rozkłady naprężeń i ciśnień dla różnych zakresów pracy silnika. Analizy numeryczne wykonano z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS. **SŁOWA KLUCZOWE:** silnik turbinowy, uszkodzenia elementów wirujących, analiza naprężeń

During the operation, rotating parts of aircraft turbine engines are exposed on different types of damage. These damages mostly ensure from the difficult work conditions of this components. The article presents examples of failure of aircraft engines resulting from damage to the compressor elements. The influence of exemplary damages in the area of the blade on the work of contact surfaces in the disk rim part and the blade footer was analyzed. The distribution of stresses and pressures was determined on assuming different ranges of rotational speed as well. Numerical analyzes were performed using the ANSYS software.

KEYWORDS: turbine engine, damage of rotating parts, stress analysis

Współczesne zespoły sprężarkowe turbinowych silników odrzutowych są układami, które muszą zachować wysoki poziom niezawodności przy bardzo wysokich obciążeniach. Te obciążenia wynikają z konieczności uzyskiwania dużego sprężu (obecnie osiąga się 50-krotny przyrost ciśnienia) przy dużych wartościach wydatku powietrza, co w rezultacie przekłada się na sprawność zespołu napędowego. Z uwagi na te zagadnienia proces projektowania zespołów sprężarek osiowych jest bardzo złożony. Poszukuje się konfiguracji zwiększającej jednocześnie ich trwałość i wydajność, a także efektywnych metod wykrywania, eliminowania i profilaktyki uszkodzeń występujących podczas eksploatacji tych podzespołów. Wciąż opracowuje się metody wykorzystujące symulacje numeryczne czy metody eksperymentalne, mogące pomóc w diagnostyce tych podzespołów. Popularnym i ciągle rozwijanym kierunkiem badań jest analiza wpływu uszkodzeń piór łopatek na poziom drgań i żywotność tych elementów (bada się np. propagację pęknięć). W pracach

[1–3] analizowano wpływ geometrii uszkodzenia, a także wpływ jego położenia (m.in. na krawędzi natarcia) na częstotliwości drgań własnych czy wytrzymałość zmęczeniową. Na podstawie analiz numeryczno-doświadczalnych wykazano, że wytrzymałość zmęczeniowa łopatki zmniejszyła się w przypadku uszkodzeń znajdujących się w niewielkiej odległości od zamka łopatki [2]. Użyteczność metod numerycznych w analizie uszkodzeń potwierdzają także prace [4, 5]. W pierwszej przedstawiono analizę CFD sprawności sprężarki z uszkodzoną łopatką (z zawiniętym wierzchołkiem pióra łopatki), a w drugiej – analizę skutków zderzenia z ciałem obcym FOD (*foreign object debris*).

Niniejszy artykuł ma przybliżyć przyczyny uszkodzeń pojawiających się podczas eksploatacji sprężarek. Ponadto przedstawiono w nim analizę wpływu wybranych uszkodzeń pióra łopatki sprężarki wysokiego ciśnienia na pracę powierzchni kontaktowych w zamku.

Uszkodzenia i ich przyczyny

Podatność sprężarek na różnego rodzaju uszkodzenia eksploatacyjne wynika z trudnych warunków pracy i usytuowania tych komponentów w całej konstrukcji. Najbardziej narażone na uszkodzenia są łopatki wieńców kierownic i wieńców wirnikowych. Uszkodzenia mogą wynikać także z nieprawidłowo wykonanych napraw, niedostatecznej inspekcji, a także czynników zewnętrznych, m.in. ze zderzenia z bryłkami lodu, ptakami czy tzw. ciałami obcymi (FOD) zassanymi przez wlot z powierzchni pasa startowego. Praca w warunkach dużego zapylenia powoduje zasykanie dużej ilości pyłów do kanału przepływowego silnika, co prowadzi do erozyjnego zużycia podzespołów, głównie sprężarki i łożysk [6, 7]. Do innych typowych uszkodzeń eksploatacyjnych elementów kompresora można zaliczyć: zarysowania powodujące pękanie materiału, obtłuczenia, wgniecenia, wyrwania i ubytki materiału spowodowane pękaniem powierzchni, zagniecenia i zniekształcenia powierzchni, zmieniające początkowy kształt lub obrys elementu (rys. 1).



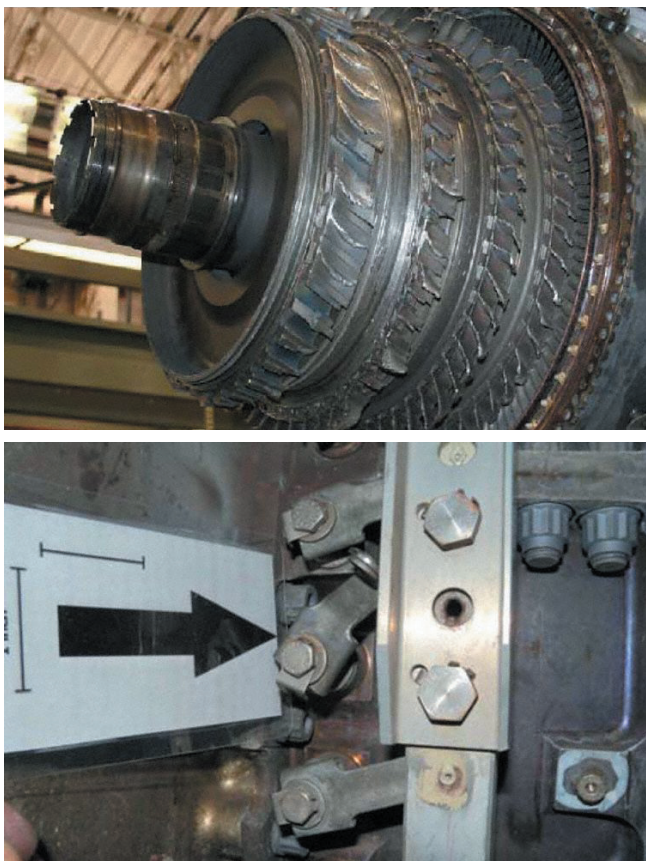
Rys. 1. Przykładowe uszkodzenia łopatek sprężarki lotniczego silnika turbinowego

* Dr hab. inż. Adam Kozakiewicz (adam.kozakiewicz@wat.edu.pl), mgr inż. Olga Grzejszczak (olga.grzejszczak@wat.edu.pl) – Wojskowa Akademia Techniczna

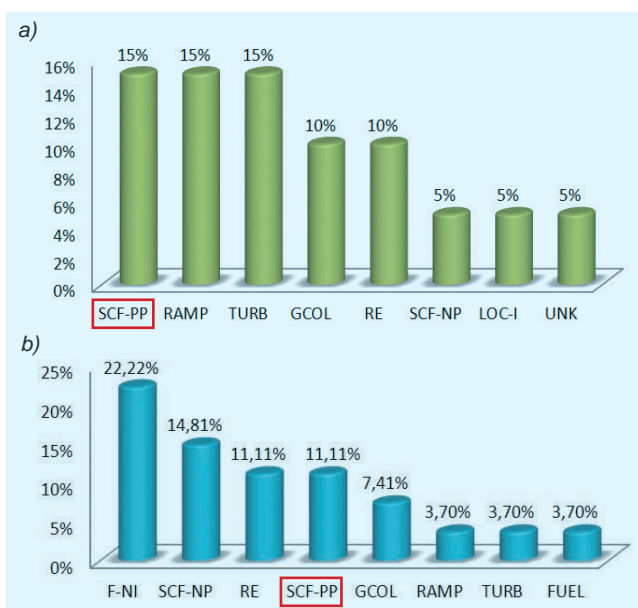
Ponieważ stan techniczny i sprawność sprężarki wpływają na osiągi i żywotność silnika, ważne jest przeprowadzanie regularnych inspekcji zespołu wirnikowego. Producenci silników w instrukcjach obsługowych dokładnie definiują rodzaje i rozmiary dopuszczalnych uszkodzeń, a także możliwości i sposoby ich ewentualnych napraw. W przypadku zespołów sprężarkowych, składających się najczęściej z kilku stopni połączonych ze sobą, zakresy inspekcji i rozmiary uszkodzeń charakteryzowane są indywidualnie dla każdego stopnia. Z danych wynika, że najmniejszymi uszkodzeniami kwalifikującymi element do wymiany są uszkodzenia na krawędzi natarcia lub spływu. Takie uszkodzenia, jak wyszczerbienia czy ubytki materiału, nie mogą sięgać na głębokość większą niż 1,0 mm, natomiast wgniecenia – na głębokość większą niż 1,5 mm.

Oto trzy przykładowe awarie sprężarek (z ostatnich 10 lat) z udziałem samolotów cywilnych:

- **Sierpień 2008 r. – Airbus A321 z silnikiem V2533** – uszkodzenia szóstego stopnia sprężarki wysokiego ciśnienia w wyniku zassania przez silnik tzw. ciała obcego (FOD) [8].
- **Lipiec 2010 r. – Boeing 777-200 z silnikiem PW 4090** – uszkodzenie wszystkich czterech stopni sprężarki niskiego ciśnienia oraz trzech z pięciu stopni sprężarki wysokiego ciśnienia. Według raportu JTSB (Japan's Transportation Safety Board) przyczyną zniszczenia sprężarki było zamknięcie się IGW (wlotowego wieńca kierownic) w trakcie wznoszenia samolotu, co spowodowało zaburzenia przepływu powietrza i krytyczne dla elementów sprężarki drgania (rys. 2) [8].
- **Listopad 2016 r. – Boeing 787-900 z silnikiem Trent 1000** – uszkodzenie pierwszego stopnia sprężarki średniego ciśnienia. Przyczyną uszkodzenia było zużycie zmęczeniowe (pęknięcie w rejonie zamka) jednej z łopatek [8].



Rys. 2. Uszkodzenia sprężarki wysokiego ciśnienia [8]

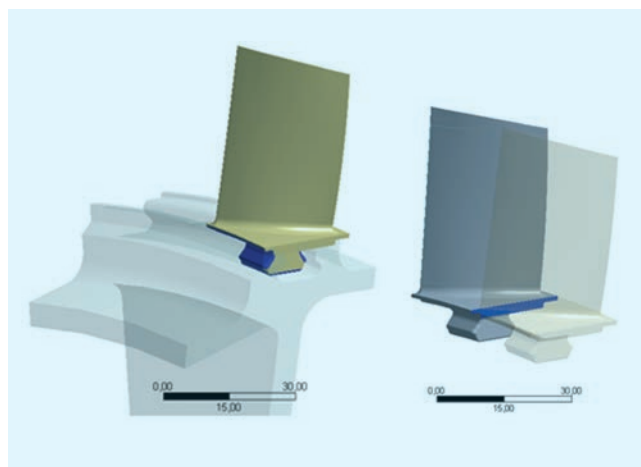


Rys. 3. Rozkład wypadków (a) i poważnych incydentów (b) jako procent na kategorię występowania w latach 2012–2016 [10]

Przedstawione przypadki uszkodzeń są jednymi z wielu, jakie zdarzają się w trakcie eksploatacji zespołów napędowych. Z danych ICAO (International Civil Aviation Organization) [9] wynika, że w latach 2012–2016 awarie silnika bądź jego nieprawidłowe działanie (kategoria SCF-PP, tj System/Component Failure or Malfunction – Powerplant) stanowiły 15% wszystkich incydentów, natomiast poważne wypadki – 11,11% (rys. 3). Większość wypadków i poważnych incydentów SCF-PP zdarzała się głównie podczas fazy startu i lotu na trasie [10].

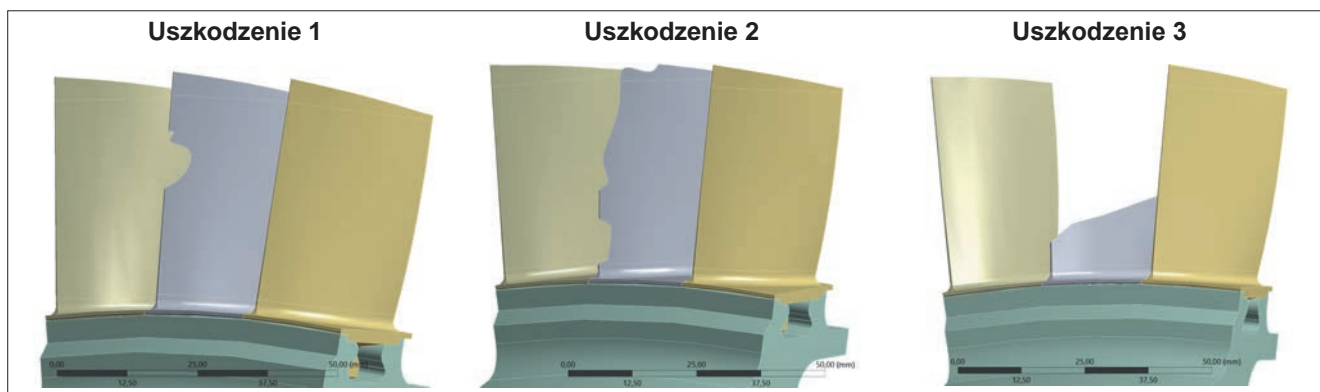
Analiza numeryczna

Analizie numerycznej MES poddano wycinek tarczy z łopatkami. Badano model nieuszkodzony oraz model z uszkodzeniem łopatki. Model geometryczny elementu powstał z wykorzystaniem procesu inżynierii odwrotnej na bazie rzeczywistej geometrii łopatki (rys. 4).



Rys. 4. Model analizowanego wycinka tarczy

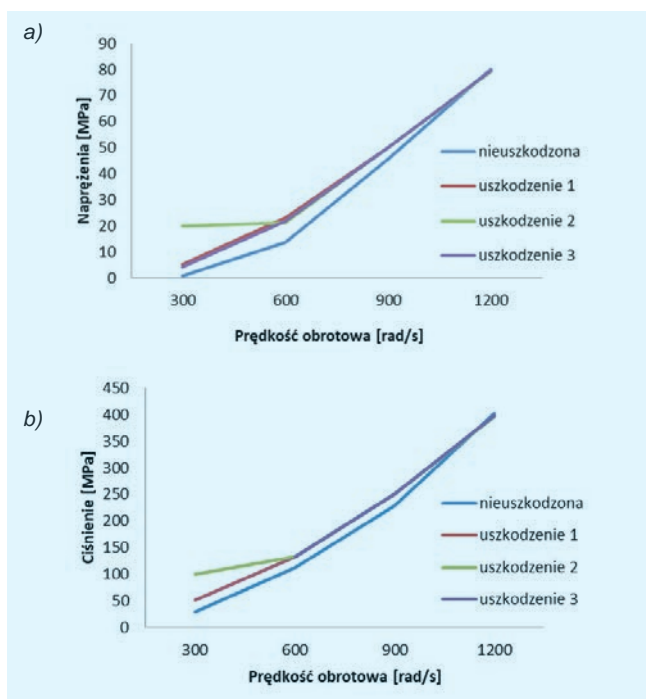
Do analizy wybrano trzy przypadki uszkodzeń pióra łopatki. Przedstawiono je na rys. 5. Te uszkodzenia różnią się stopniem ubytku materiału na jednej z trzech łopatek (łopatce środkowej) rozpatrywanego wycinka (patrz tablica).



Rys. 5. Typy uwzględnianych uszkodzeń łopatki: uszkodzenie 1 – lokalny ubytek materiału pióra, uszkodzenie 2 – ubytek na całej krawędzi natarcia, uszkodzenie 3 – znaczny ubytek pióra łopatki

TABLICA. Stopień ubytku masy łopatki

Uszkodzenie	Brak	Typ 1	Typ 2	Typ 3
Masa, kg	0,01371	0,01365	0,01351	0,01039
Ubytek masy, %	–	0,47%	1,46%	24,23%



Rys. 6. Zmiana naprężeń (a) i nacisków (b) na powierzchniach kontaktowych w funkcji prędkości obrotowej

Do obliczeń przyjęto stop tytanu Ti-6Al-4V, stosowany w tego typu rzeczywistych konstrukcjach. Obciążenie konstrukcji stanowią siły bezwładności, wynikające z zadanej względem osi obrotu prędkości obrotowej, oraz obciążenia cieplne. Przyjęta prędkość obrotowa zmienia się od 300 do 1200 rad/s. Analizy obejmowały 16 różnych przypadków. Wyznaczono rozkłady maksymalnych naprężeń i nacisków na powierzchniach kontaktowych łopatka–tarcza. Rozpatrzono trzy wspomniane rodzaje uszkodzeń oraz – dla porównania – model z nieuszkodzoną łopatką. Rozkłady naprężeń i ciśnień przy zmieniającej się prędkości obrotowej przedstawiono na rys. 6.

Przeprowadzone analizy pozwoliły ocenić, jak bardzo uszkodzenie pióra łopatki wpływa na pracę powierzchni kontaktowych zamek–wieńiec (uwzględniając uszkodzoną łopatkę oraz łopatki z nią sąsiadujące w tarczy). Można zauważyć, że dla uszkodzenia 2 (tj. ubytku masy wzdłuż

całej krawędzi natarcia) otrzymano większe naprężenia i naciski (ciśnienia) przy niskim zakresie prędkości obrotowej (300÷600 rad/s) niż dla pozostałych rozpatrywanych przypadków. Inne uszkodzenia powodowały tylko nieznaczny wzrost naprężeń na powierzchniach kontaktowych, np. przy prędkości 900 rad/s – od 45 MPa dla nieuszkodzonej łopatki do ok. 49÷50 MPa dla łopatki uszkodzonej. Przy prędkości 1200 rad/s otrzymano porównywalne wartości naprężeń (na poziomie 80 MPa) dla wszystkich przypadków uszkodzeń.

Podsumowanie

Niska prędkość obrotowa może niekiedy mieć bardziej krytyczny wpływ na współpracujące ze sobą elementy wirnika sprężarki niż prędkość ze standardowego zakresu pracy takich konstrukcji. W konsekwencji mogą się rozwijać uszkodzenia zmęczeniowe w obszarze wieńca czy zamka łopatki. Uszkodzenia zespołów sprężarek mają złożony charakter i nadal zachodzi konieczność poznania przyczyn awarii zespołów napędowych nowoczesnych silników turbinowych. Rozwój nowych technologii, materiałów i metod badawczych oraz wprowadzanie dodatkowych inspekcji nadal nie wystarcza, co bardzo dobrze obrazują statystyki przedstawiane przez ICAO.

Zagadnienia uszkodzeń zespołów napędowych, w tym zwłaszcza zespołów wirnikowych, wciąż stanowią pole do rozwoju i badań.

LITERATURA

- Rygiel P., Obrocki W., Sieniawski J. "Numerical vibration analysis of turbine engine compressor blades depending on geometry and position of the damage". *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 41, 1 (2017): s. 43–55.
- Obrocki W., Setkiewicz A. i in. „Wpływ uszkodzenia krawędzi natarcia łopatek sprężarki silnika lotniczego na ich wytrzymałość zmęczeniową”. *Mechanik*. 3 (2018): s. 205–209.
- Witek L. "Vibration analysis for detecting failure of compressor blade". *Engineering Failure Analysis*. 25, 1 (2012): s. 211–218.
- Yanling Li, Abdunaser Sayma. "Effects of blade damage on the performance of a transonic axial compressor rotor". *ASME Turbine Technical Conference and Exposition*. Vol. 8, 2012: s. 2427–2437.
- Guan Yupu, Zhao Zhenhua i in. "Foreign object damage to fan rotor blades of aeroengine. Part II: Numerical simulation of bird impact". *Chinese Journal of Aeronautics*. 21 (2008): s. 328–334.
- Kozakiewicz A. „Analiza uszkodzeń turbinowych silników odrzutowych”. *Prace Instytutu Lotnictwa*. 213, 22 (2011): s. 224–234.
- Szczepankowski S., Szymczak J. „Wpływ zapyłonego otoczenia na charakterystyki i parametry pracy lotniczych silników turbinowych”. *Journal of KONBiN*. 17, 1 (2011): s. 257–268.
- www.avherald.com.
- "MID Annual Safety Report". MID Annual Safety Report Team, Second Meeting (MID-ASRT/2), ICAO, 2018.
- "Aviation Occurrence Categories, Definitions and Usage Notes (4.2)". Montreal: Common Taxonomy Team, ICAO, 2011.