

Metodyka pomiaru amplitudy drgań pióra łopatki sprężarki silników lotniczych w próbie zmęczeniowej

The methodology for measuring the vibration amplitude of the blade of the aircraft engine compressor in the fatigue test

LESZEK BIELEND
WOJCIECH OBROCKI
MACIEJ MASŁYK
JAN SIENIAWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.3.38>

Przeanalizowano wyniki badań porównawczych różnych typów czujników stosowanych w pomiarach amplitudy drgań pióra łopatki sprężarki silników lotniczych w próbie zmęczeniowej. Zbadano czujniki: indukcyjny, pojemnościowy, wiroprowodowy, laserowy oraz drgań. Scharakteryzowano je i przedstawiono ich wady. Zaprojektowano i wykonano dodatkowe oprzyrządowanie stanowiska badawczego, m.in. uchwyt mocujący.

SŁOWA KLUCZOWE: pomiar amplitudy drgań, czujnik indukcyjny, czujnik pojemnościowy, czujnik wiroprowodowy, głowica laserowa, czujnik drgań

Results of comparison research of various sensors types used in the fatigue tests for aircraft engine compressor blade vibration amplitude measurement were analysed. Sensors under tests: inductive, capacitive, eddy-current, laser and vibration. Presented were sensors characteristics and their faults. Additional test stand instrumentation was designed and performed, including mounting bracket.

KEYWORDS: measurement of vibration amplitude, inductive sensor, capacitive sensor, eddy current sensor, laser head, vibration sensor

Łopatki wirnika sprężarki i kierownicy należą do krytycznych elementów konstrukcji turbinowych silników lotniczych. Od ich trwałości zależy bezpieczeństwo eksploatacji silników i statków powietrznych. Dlatego producenci silników muszą kontrolować ich właściwości wytrzymałościowe już w procesie wytwarzania. Łopatki sprężarki są podczas pracy narażone na oddziaływanie zmiennych obciążeń zginających i skręcających od sił aerodynamicznych strumienia przepływających gazów oraz zmiennych obciążeń rozciągających wywołanych siłą odśrodkową. Analiza danych literaturowych i wyników badań własnych wskazuje, że uszkodzenia łopatek spowodowane są najczęściej działaniem sił zginających. Witek [1–3], m.in. na podstawie badań łopatek wirnika sprężarki po eksploatacji, wykazał, że główną przyczyną ich pęknięcia są przede wszystkim zmienne obciążenia zginające.

Obecnie stalowe łopatki sprężarki w procesie produkcji podlegają ocenie wytrzymałości zmęczeniowej. Przyjmuje się w tych badaniach podstawę próby zmęczeniowej $N_G = 5 \cdot 10^6$ cykli. Próba zmęczeniowa prowadzona jest dla losowo wybranych łopatek (próbek) i jej rezultat jest uogólniany zgodnie z przyjętym algorytmem analizy i wnioskowania statystycznego [4].

Próby zmęczeniowe dla dużej liczby cykli są czasochłonne i współczesne metody określania wytrzymałości zmęczeniowej łopatek wpływają na koszty ich produkcji.

Dlatego prowadzone są jednocześnie badania nad nową metodą, umożliwiającą przede wszystkim skrócenie czasu próby zmęczeniowej oraz jej pełną kontrolę.

Badania własne – stanowisko i metodyka pomiaru

W pracy podjęto się opracowania metodyki pomiaru amplitudy drgań pióra łopatki silnika lotniczego w próbie zmęczeniowej, w warunkach dużej liczby cykli. Podstawowym podzespołem stanowiska badawczego jest elektrodynamiczny wzbudnik drgań model V-830 (4) firmy LDS (tabl. I, rys. 1). Stanowisko wyposażono dodatkowo w: komorę klimatyczną (1), umożliwiającą wprowadzanie zmian w środowisku, m.in. wilgotności i temperatury od -80 do 180°C ; wzmacniacz mocy (2) i komputerowy system sterowania próbą (3). Badania prowadzono w Uczelnianym Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego oraz Katedrze Nauki o Materiałach Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

TABLICA I. Charakterystyka techniczna elektrodynamicznego wzbudnika drgań LDS V-830 [5]

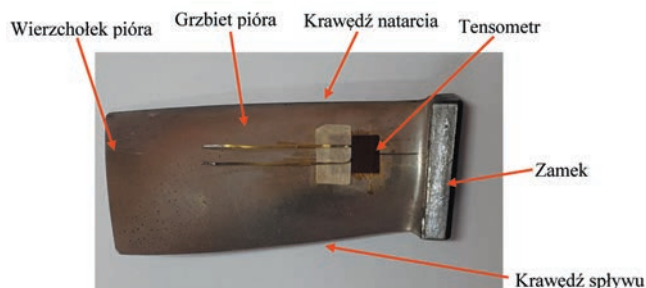
Maksymalna siła w cyklu sinusoidalnym, kN	6,78
Częstotliwość rezonansowa głowicy pulsatora, Hz	3100
Maksymalna prędkość głowicy pulsatora, m/s	2
Maksymalne przyspieszenie głowicy, m/s^2	1176,7
Maksymalne przemieszczenie głowicy, m	0,0254
Masa pulsatora, kg	616
Maksymalna masa badanego obiektu, kg	160
Zakres częstotliwości pracy, Hz	5+3500



Rys. 1. Stanowisko badawcze do prowadzenia prób zmęczeniowych łopatek sprężarki: 1 – komora klimatyczna, 2 – wzmacniacz mocy, 3 – komputerowy system sterowania próbą, 4 – elektrodynamiczny wzbudnik drgań

* Mgr inż. Leszek Bielenda, mgr inż. Wojciech Obrocki, mgr inż. Maciej Masłyk, prof. dr hab. inż. Jan Sieniawski (jansien@prz.edu.pl) – Katedra Nauki o Materiałach – Laboratorium Badań dla Przemysłu Lotniczego, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej

Próby zmęczeniowe i pomiary amplitudy drgań prowadzono dla stalowych łopatek pierwszego stopnia sprężarki o długości i szerokości pióra odpowiednio: 53 i 22 mm. Tensometry TF-3 o podstawie pomiarowej 3 mm mocowano na powierzchni pióra łopatki w stałej odległości od zamka – 8 mm (rys. 2). Opracowane i wykonane oprzyrządowanie dodatkowe stanowiska badawczego (rys. 3) umożliwiała prowadzenie próby zmęczeniowej łopatki w trakcie dużej liczby cykli. Łopátka (5) jest mocowana w uchwycie (1) za pomocą śruby dociskowej (3). Oprzyrządowanie stanowiska uzupełniono o czujnik drgań (2), głowicę lasera (4) i mikroskop świetlny (6).



Rys. 2. Łopátka sprężarki z tensometrem TF-3



Rys. 3. Oprzyrządowanie dodatkowe stosowane w próbie zmęczeniowej: 1 – uchwyt śrubowy, 2 – czujnik drgań, 3 – śruba dociskowa, 4 – głowica lasera, 5 – badana łopátka, 6 – mikroskop świetlny

Kontrolę przebiegu próby zmęczeniowej łopatek zapewnia opracowany autorski system sterowania. Jako podstawę tego systemu przyjęto rozwiązania firmy National Instruments. Program kontroluje pracę pulsatora, a jednocześnie zapewnia uzyskanie wymaganej wartości amplitudy i częstotliwości drgań głowicy. Umożliwia wprowadzenie pióra łopatki w drgania rezonansowe. Stała wartość amplitudy drgań pióra łopatki jest warunkiem jej stałego obciążenia dynamicznego w czasie próby zmęczeniowej.

Podczas próby zmęczeniowej prowadzono pomiary: amplitudy i częstotliwości drgań głowicy pulsatora oraz przemieszczenia wierzchołka pióra łopatki. Ustaloną wartość naprężenia na powierzchni pióra łopatki określono za pomocą tensometru.

Amplitudę i częstotliwość drgań głowicy pulsatora określano za pomocą piezoelektrycznego czujnika zamocowanego do uchwytu łopatki. Pomiary amplitudy przemieszczenia wierzchołka pióra drgającej łopatki wykonano natomiast metodą optyczną z użyciem mikroskopu świetlnego typu PZO 21338. Ciągłą kontrolę przemieszczania się wierzchołka pióra drgającej łopatki prowadzono z wykorzystaniem czujników zakwalifikowanych do badań pomiarowych, m.in. indukcyjnego B&K MM-002, pojemno-

ściowego B&K MM-004 i wiroprowadowego Bently Nevada 3300, oraz głowicy laserowej Keyence LK-G402 i czujnika drgań Endevco 22.

Pomiary odkształcenia łopatki prowadzono na powierzchni jej pióra za pomocą tensometru TF-3 o podstawie pomiarowej 3 mm. Wartości naprężenia w zakresie sprężystym wyznaczano z uwzględnieniem prawa Hooke'a.

Podstawą opracowanego układu pomiarowego były czujniki pomiaru wartości przemieszczenia wierzchołka pióra łopatki oraz wzmacniacz mierzonego sygnału. Sygnałem wyjściowym dla czujników przemieszczenia była wartość napięcia. Zmierzone ją woltomierzem FLUKE 87V. Użycie czujnika drgań wymagało podwójnego całkowania sygnału wyjściowego, aby uzyskać sygnał przemieszczenia.

Pióro łopatki w czasie próby zmęczeniowej podlega cyklicznemu obciążeniu zginającemu, aby uzyskać odpowiednią wartość naprężenia w jej przekroju. Założono, że wymuszona częstotliwość drgań łopatki odpowiada częstotliwości jej drgań własnych. Początek okresu zmniejszenia częstotliwości drgań własnych łopatki świadczy więc o zmianach w warstwie wierzchniej pióra i o inicjacji mikropęknięcia zmęczeniowego oraz jego propagacji [6–11].

Pomiary amplitudy drgań wierzchołka łopatki prowadzono z użyciem czujników o charakterystycznych właściwościach, m.in. indukcyjnego, pojemnościowego, wiroprowadowego, laserowego oraz czujnika drgań (tabl. II). Wyniki pomiarów stanowić będą podstawę analizy porównawczej i ustalenia kryterium doboru rodzaju czujnika do próby zmęczeniowej.

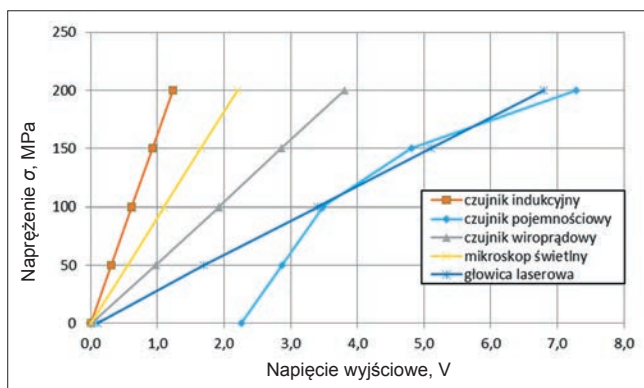
TABLICA II. Charakterystyka techniczna czujników do pomiaru przemieszczenia wierzchołka łopatki sprężarki w próbie zmęczeniowej

Typ czujnika	Odległość pomiarowa, m	Temperatura pracy, °C	Częstotliwość pracy, kHz	Uwagi
Czujnik indukcyjny (Brüel & Kjær MM-002)	< 9	-150+250	< 2	dynamiczny
Czujnik pojemnościowy (Brüel & Kjær MM-004)	bd.	< 250	< 200	statyczny i dynamiczny
Czujnik wiroprowadowy (Bently Nevada 3300)	< 2	-35+177	< 10	statyczny i dynamiczny
Głowica laserowa (Keyence LK-G402)	< 200	< 50	< 50	statyczny i dynamiczny
Czujnik drgań (Endevco 22 Picomin)	nd.	-73+149	< 12	dynamiczny

Wyniki badań i ich analiza

Jako podstawę do analizy wartości amplitudy przemieszczenia wierzchołka pióra łopatki podczas próby zmęczeniowej przyjęto wartości napięcia wyjściowego, określone za pomocą czujników: indukcyjnego, pojemnościowego, wiroprowadowego i laserowego. Ustalono zależność naprężenia pióra łopatki od napięcia wyjściowego (rys. 4 i tabl. III).

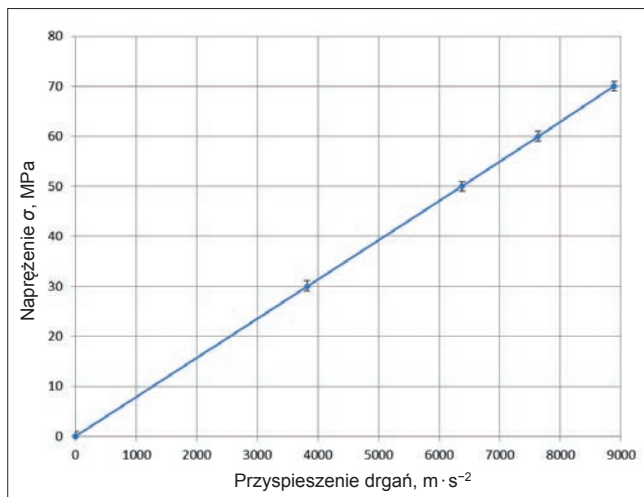
Wstępna analiza wyników badań pozwala stwierdzić, że w przyjętym zakresie pomiarowym uzyskano zależność proporcjonalną – charakterystyka wartości naprężenia pióra łopatki i napięcia wyjściowego dla czujnika wiroprowadowego, indukcyjnego, laserowego i dla pomiaru długości odchylen za pomocą mikroskopu świetlnego jest liniowa. Ustalono również, że czujnik drgań zastosowany do pomiaru amplitudy przemieszczenia wierzchołka pióra łopatki, zamocowany na powierzchni grzbietu pióra,



Rys. 4. Naprężenia pióra łopatki w zależności od napięcia wyjściowego dla różnego typu czujników

TABLICA III. Naprężenie pióra łopatki w zależności od napięcia wyjściowego dla różnego typu czujników

Naprężenie, MPa	Przesunięcie wierzchołka pióra, mm (mikroskop PZO)	Napięcie wyjściowe, V			
		MM-002 (cz. poj.)	MM-004 (cz. ind.)	3300 5 mm (cz. wiroprow.)	LK-G402 (cz. laser.)
0	0,00	2,3	0,0	0,0	0,1
50	0,28	2,9	0,3	1,0	1,7
100	0,55	3,5	0,6	1,9	3,4
150	0,83	4,8	0,9	2,9	5,1
200	1,10	7,3	1,2	3,8	6,8



Rys. 5. Naprężenia pióra łopatki w zależności od przyspieszenia drgań

TABLICA IV. Naprężenie pióra łopatki wyznaczone w zależności od przesunięcia wierzchołka pióra sygnału wyjściowego czujnika drgań Endevo 22

Naprężenie, MPa	Odchylenie standardowe, MPa	Mikroskop PZO	Czujnik drgań Endevo 22	
		Przesunięcie, mm	Przyspieszenie, m·s ⁻²	Przesunięcie, mm
0	0,55	0	0	0
30	0,47	0,165	3820	0,15
50	0,50	0,275	6381	0,25
60	0,41	0,330	7633	0,30
70	0,43	0,385	8889	0,35

wpływa na zmianę częstotliwości rezonansowej tej amplitudy. Częstotliwość ta uległa zmniejszeniu od 833 do 800 Hz. Wykazano także, że dodatkowa masa wprowadzona na powierzchnię pióra drgającej łopatki uniemożliwia uzyskanie naprężenia > 70 MPa (rys. 5).

Podsumowanie

Analiza wyników badań wskazuje, że do pomiaru amplitudy przemieszczenia wierzchołka łopatki w przypadku zmiennej wartości naprężenia dobrym rozwiązaniem jest zastosowanie głowicy laserowej. Charakteryzuje się ona dużym zakresem odległości pomiarowej. Umożliwia łatwy montaż czujnika na stanowisku badawczym w porównaniu z czujnikami pojemnościowymi, indukcyjnymi, wiroprowodowymi i z czujnikiem drgań. Wadą głowicy laserowej jest niska temperatura pracy – do 50°C (tabl. II). Duża odległość pomiędzy badaną łopatką a głowicą laserową umożliwia jednak pomiary amplitudy przemieszczania się jej wierzchołka przy wyższej temperaturze niż temperatura pracy głowicy lasera. Ponadto zastosowanie głowicy laserowej pozwala na pomiary amplitudy drgań o częstotliwości do 50 kHz.

Stwierdzono również, że pomiar amplitudy drgań łopatki podczas próby zmęczeniowej z użyciem czujnika drgań nie jest możliwy w całym zakresie pomiarowym. Czujnik drgań ze względu na dodatkową masę wprowadzoną do układu nie pozwolił na uzyskanie poziomu naprężenia pióra łopatki sprężarki > 70 MPa. Może być stosowany, gdy masa badanego obiektu jest dużo większa od masy czujnika.

Pozostałe rodzaje czujników – pojemnościowy, indukcyjny i wiroprowodowy – charakteryzowały się dobrą stabilnością sygnału wyjściowego podczas próby zmęczeniowej. Trudne było jednak dokładne ustalenie odległości pomiędzy czujnikiem i obiektem. Czujniki te mają mniejszy zakres pomiarowy niż głowica lasera. Jednak podczas pomiarów w wysokiej temperaturze otoczenia uzyskują przewagę i w takich przypadkach powinny być wybierane (tabl. II).

LITERATURA

- Witek L. „Metodyka eksperymentalnych badań prędkości propagacji pęknięć zmęczeniowych w łopatkach sprężarki silnika turbinowego PZL-10W”. *Journal of Aeronautics Integra.* 2 (2009): s. 71–80.
- Witek L., Wierzińska M., Poznańska A. „Fracture analysis of compressor blade of a helicopter engine”. *Engineering Failure Analysis.* 16, 5 (2009): s. 1616–1622.
- Witek L. „Experimental crack propagation and failure analysis of the first stage compressor blade subjected to vibration”. *Engineering Failure Analysis.* 16, 7 (2009): s. 2163–2170.
- Sobczak M. „Statystyka – aspekty praktyczne i teoretyczne”. Lublin: Wydawnictwo UMCS, 2006.
- „Dokumentacja techniczna systemu wibracyjnego LDS V830”. Manual 805341. Edition, Amendment 32: Royston, Herts SG8 5BQ.
- Radaj D. „Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures”. Cambridge: Abington, CB1 6AH, 1990.
- Szala J. „Zastosowanie programowalnych badań zmęczeniowych dla wyznaczenia granicy zmęczenia”. *Mechanika Teoretyczna i Stosowana.* 3 (1988): s. 26.
- Wyrzykowski J., Pleszakow E., Sieniawski J. „Odstalacenie i pęknięcie metalu”. Warszawa: WNT, 1999.
- Witek L. „Vibration analysis for detecting failure of compressor blade”. *Engineering Failure Analysis.* 25, 1 (2012): s. 211–218.
- Poznańska A., Śniezek M., Wierzińska M. „Pitting Corrosion – Main Factor Generating Fracture of the Compressor of Aero Engine Blades under Operation”. Rzeszów, 2003.
- Nikhamkin N. „Crack propagation in turbojet blades. Experimental technique and results”. *International Journal of Fatigue.* 18, 8 (1996): s. 604–610.