

Wpływ uszkodzenia krawędzi natarcia łopatek sprężarki silnika lotniczego na ich wytrzymałość zmęczeniową

Influence of aircraft engine compressor blades leading edge damage on their fatigue strength

WOJCIECH OBROCKI
AMADEUSZ SETKOWICZ
MACIEJ MASŁYK
JAN SIENIAWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.3.35>

Przeanalizowano wyniki badań wpływu długości uszkodzenia pióra łopatki sprężarki silnika lotniczego (z uwzględnieniem położenia tego uszkodzenia na krawędzi pióra) na jej wytrzymałość zmęczeniową w warunkach dużej liczby cykli. Opracowano kryteria klasyfikacji uszkodzeń łopatki oraz metody badań. Zaprojektowano i wykonano oprzyrządowanie do próby zmęczeniowej łopatek sprężarki. Do ustalenia źródła inicjacji pęknięcia zmęczeniowego i kierunku jego propagacji podczas próby zmęczeniowej zastosowano metodę fluorescencyjną.

SŁOWA KLUCZOWE: silnik lotniczy, sprężarka, łopatka, badania zmęczeniowe, wytrzymałość zmęczeniowa

Article presents the research results of aircraft compressor blade damage length and its position influence on fatigue strength under high number cycles conditions. The criteria for blade damage detection classification and test research methodology were developed. Designed and tested the instrumentation for compressor blades fatigue tests. Fluorescent method was used to determine the source of fatigue cracking initiation and its propagation direction during fatigue test.

KEYWORDS: aircraft engine, compressor, blade, fatigue tests, fatigue strength

Ze względu na zapewnienie bezpieczeństwa w lotnictwie oraz dążenie do obniżania kosztów eksploatacji statków powietrznych konieczne jest poszukiwanie innowacyjnych rozwiązań kontroli podzespołów i zespołu wirującego, zwłaszcza elementów krytycznych tych konstrukcji. Jednocześnie przyjęte rozwiązania muszą spełniać najwyższe standardy bezpieczeństwa eksploatacji napędów lotniczych [1].

Obecna tendencja do budowania silników lotniczych o dużej mocy i sprawności oraz zdecydowanie mniejszej masie prowadzi do zwiększenia obciążeń poszczególnych podzespołów i ich elementów. Przykładowo łopatki robocze sprężarki są bardziej obciążone, a jednocześnie mają mniejszą grubość pióra oraz złożone kształty powierzchni roboczej. Dodatkowo podczas eksploatacji występuje intensywne zużycie erozyjne łopatek i ich korozja na skutek oddziaływania warunków eksploatacji. Uwzględnienie tych czynników powoduje, że rosną wymagania projektowe dotyczące łopatek sprężarek silników lotniczych spełniających wysokie kryteria bezpieczeństwa [1].

Na przełomie XX i XXI w. dokonał się postęp w teoretycznej analizie strumienia gazów przemieszczających się w podzespołach sprężarki i turbiny silników lotniczych. Opracowano doskonalsze modele nowych konstrukcji silników, a także ich obciążeń i warunków pracy. Wprowadzono nowoczesne metody obliczeniowe w procesach symulacji numerycznej. Mimo rozwoju metod symulacji numerycznej nie uwzględniają one jednak wszystkich zjawisk charakterystycznych dla pracy podzespołów silników lotniczych. Dlatego badania doświadczalne modeli i rzeczywistych obiektów wciąż mają duże znaczenie zarówno w stadium projektowania i wykonania, jak i eksploatacji konstrukcji silników lotniczych. Wyniki eksperymentów stanowią podstawę do weryfikacji przyjętych modeli. Niezbędne są również do identyfikacji i teoretycznego uzasadnienia zjawisk fizycznych typowych dla pracy silników lotniczych [2].

Analiza danych literaturowych i wyników badań własnych wskazuje, że większość awarii sprężarek silników lotniczych jest spowodowana uszkodzeniem łopatek oraz ich niedostateczną wytrzymałością w warunkach obciążeń stałych i zmiennych [3]. Ustalono, że pęknięcia zmęczeniowe są przyczyną ok. 70÷80% awarii silników. Analiza procesu inicjacji i propagacji tych pęknięć potwierdziła, że ich główną przyczyną są trudne warunki pracy łopatek. Łopatki są m.in. narażone na uszkodzenia przez ciała stałe [4] – cząstki o dużej twardości, najczęściej pochodzenia mineralnego. Znajdują się one w powietrzu zasasywanym do kanałów przepływowych silnika i powodują erozyjne zużycie elementów konstrukcji [5]. Również ciała stałe o większych rozmiarach, np. fragmenty nawierzchni płyty lotniska, wywołują uszkodzenia. Łopatki silników lotniczych podczas pracy są więc w dużym stopniu narażone na zderzenie z ciałem obcym (FOD).

Ze względu na charakter pracy łopatek podczas ich eksploatacji muszą być zachowane właściwości użytkowe określone na etapie projektowania silnika. Łopatki sprężarki silników lotniczych pracują w warunkach zmęczenia małej liczby cykli (zmiana prędkości obrotowej) oraz zmęczenia dużej liczby cykli (drżenie łopatek, zmiana dynamiki przepływu gazów).

Analiza przyczyn awarii silników wskazuje, że w większości przypadków łopatka po zderzeniu z ciałem obcym zmniejsza swoją wytrzymałość zmęczeniową. Efektem odkształcenia plastycznego materiału w strefie zderzenia jest karb, w którym następuje koncentracja naprężeń i zmniejsza się wytrzymałość zmęczeniowa. Stwierdzono, że w zależności od wartości energii uderzenia FOD inicjacja i propagacja pęknięcia zmęczeniowego mają różny charakter [6]. Dodatkowo ciągła zmiana kształtu powierzchni krzywoliniowej pióra łopatki oraz zmiana

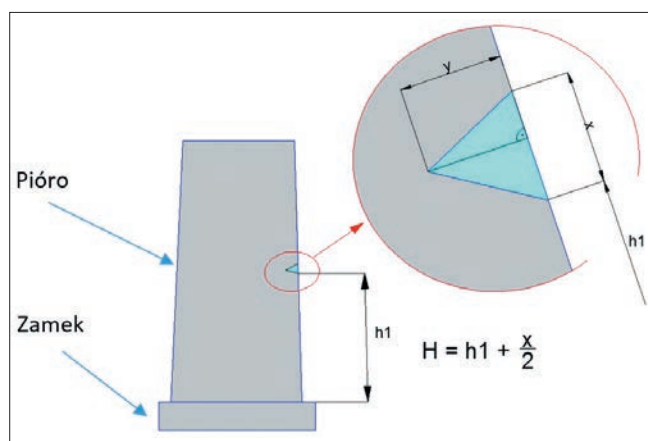
* Mgr inż. Wojciech Obrocki, mgr inż. Amadeusz Setkowicz, mgr inż. Maciej Masłyk, prof. dr hab. inż. Jan Sieniawski (jansien@prz.edu.pl) – Katedra Nauki o Materiałach – Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej

powierzchni jej przekroju następują trudności w ustaleniu stopnia oddziaływania uszkodzeń tych elementów przez ciała stałe. Te zagadnienia wciąż są w centrum zainteresowania konstruktorów napędów lotniczych [7, 8].

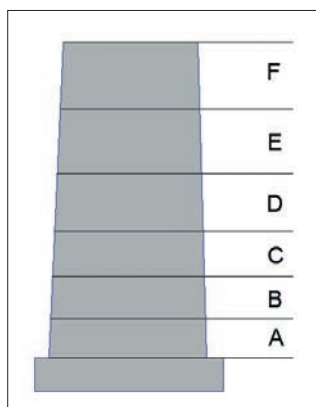
Celem podjętych badań jest próba opracowania metodyki oceny wpływu uszkodzenia krawędzi natarcia łopatek sprężarki silnika lotniczego na ich wytrzymałość zmęczeniową.

Materiał i metodyka badań

Do badań przyjęto łopatki pierwszego stopnia sprężarki silnika lotniczego, wykonane ze stali martenzytycznej o składzie chemicznym: 11% Cr; 1,6% W; 1,5% Ni; 0,35% Mo; 0,18% V; 0,11% C; 0,03% P i 0,025% S. Na potrzeby realizacji głównego celu badań opracowano kryteria klasyfikacji uszkodzeń łopatki w zależności od ich długości i położenia na krawędzi natarcia względem zamka łopatki. Wyodrębniono pięć stref wysokości pióra łopatki i osiem grup długości uszkodzenia (rys. 1 i 2 oraz tabl. I i II) [9].



Rys. 1. Schemat łopatki sprężarki i metodyka pomiaru uszkodzeń



Rys. 2. Strefy położenia uszkodzeń pióra łopatki

TABLICA I. Grupy uszkodzenia pióra łopatki w zależności od jego długości

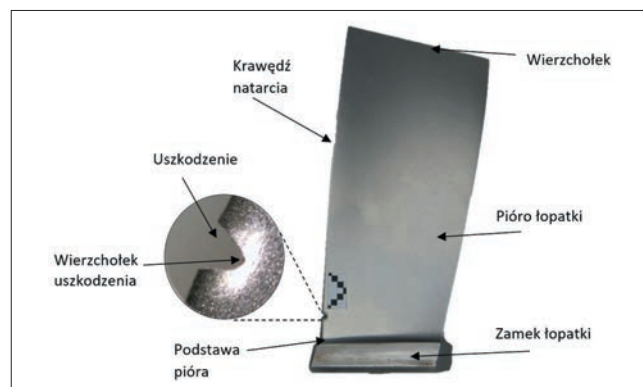
Grupa uszkodzenia	Długość uszkodzenia y, mm
I	0÷0,099
II	0,1÷0,199
III	0,2÷0,299
IV	0,3÷0,499
V	0,5÷0,999
VI	1÷1,999
VII	2÷2,999
VIII	> 3

TABLICA II. Strefy położenia uszkodzenia pióra łopatki w zależności od odległości od zamka łopatki

Strefa położenia uszkodzenia	Odległość od zamka łopatki H, mm
A	0÷5,99
B	6÷12,99
C	13÷23,99
D	24÷43,99
E	44÷54,5

Na specjalnym stanowisku wykonano uszkodzenia modelowe pióra łopatki. Zmierzono długość każdego z nich i przyporządkowano do określonej grupy (rys. 3).

Próbie zmęczeniową dla dużej liczby cykli przeprowadzono za pomocą maszyny wytrzymałościowej – elektrodynamicznego wzbudnika drgań LDS V830 firmy Brüel & Kjær. W celu opracowania wykresu Wöhlera wykonano próbę zmęczeniową 30 próbek. Określono średnią wartość granicy zmęczenia na podstawie badań 15 próbek. Stosowano metodę narastających obciążeń. W badaniach przyjęto podstawę próby zmęczeniowej $N_G = 1 \cdot 10^7$ cykli oraz początkową amplitudę naprężenia $\sigma_1 = 363$ MPa. Amplitudę naprężenia zwiększano o $\Delta\sigma = 29,4$ MPa. Wytrzymałość zmęczeniową wyznaczono w warunkach naprężeń okresowo zmiennych o charakterze sinusoidalnym [10].



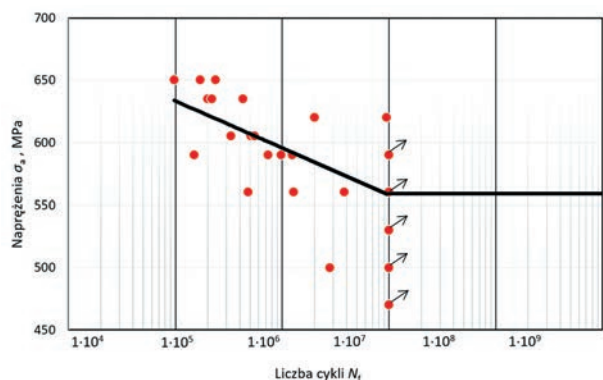
Rys. 3. Krawędź natarcia łopatki z uszkodzeniem w strefie A; grupa uszkodzenia – V

Opracowano metodykę badań nieniszczących łopatek po próbie zmęczeniowej. Przyjęto nieniszczącą metodę penetracyjno-fluorescencyjną. Zastosowano penetrant fluorescencyjny UVF-4, zmywacz BRE-S, wywoływacz fluorescencyjny UVE oraz źródło światła ultrafioletowego.

Łopatki były myte ultradźwiękowo w roztworze alkoholu izopropylowego (w celu odtłuszczenia) przez 120 s i suszone w sprężonym powietrzu. Penetrant UVF-4 nanoszono na powierzchnię pióra łopatki – czas jego oddziaływania wynosił od 5 do 6 min. Łopatkę następnie zanurzono w zmywaczu BRE-S i suszono sprężonym powietrzem. Na tak przygotowaną powierzchnię pióra łopatki nakładano wywoływacz UVE.

Wyniki badań i ich analiza

Próba zmęczeniowa, jakiej poddano nowe, nieuszkodzone łopatki, była podstawą do opracowania wykresu Wöhlera, ilustrującego poziom naprężenia σ_a w funkcji liczby cykli do zniszczenia N_f (rys. 4) [11]. Jako główne kryterium w ocenie wpływu stopnia oddziaływania uszkodzenia na wytrzymałość zmęczeniową łopatek przyjęto wytrzymałość zmęczeniową łopatek nieuszkodzonych $\sigma_z = 563$ MPa.



Rys. 4. Krzywa Wöhlera dla łopatek pierwszego stopnia sprężarki turbiny silnika lotniczego

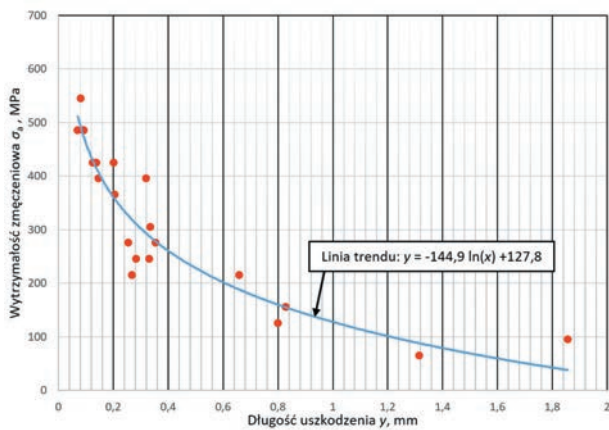
Analiza wyników (tabl. III) wskazuje na zmianę zależności wytrzymałości zmęczeniowej łopatki od długości uszkodzenia i jego położenia w strefie pióra (rys. 6). Zwiększenie długości uszkodzenia w strefach A, B i C powoduje zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej łopatek. Przykładowo uszkodzenie o długości 1,5 mm, zlokalizowane w strefach A, B i C, znacznie zmniejsza wytrzymałość zmęczeniową łopatki – do 100 MPa. Uszkodzenie materiału krawędzi natarcia pióra do głębokości 3,5 mm w strefach D i E nie oddziałuje natomiast na wytrzymałość zmęczeniową łopatki (rys. 6). Największy efekt obniżenia wytrzymałości zmęczeniowej łopatki zanotowano dla uszkodzeń położonych w odległości do 24 mm od jej zamka. Przykładowo uszkodzenie o długości ok. 0,4 mm powoduje zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej do 200 MPa.

TABLICA III. Wytrzymałość zmęczeniowa uszkodzonych łopatek w zależności od długości i położenia uszkodzenia na krawędzi pióra łopatki

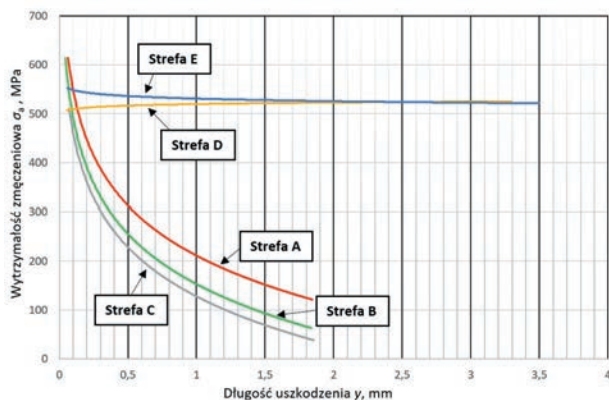
Nr łopatki	Grupa uszkodzenia	Strefa położenia uszkodzenia	Wytrzymałość zmęczeniowa σ_a , MPa	Nr łopatki	Grupa uszkodzenia	Strefa położenia uszkodzenia	Wytrzymałość zmęczeniowa σ_a , MPa
L0059	II	E	545	L0113	IV	A	305
L0060	I	E	545	L0114	IV	A	305
L0061	V	E	575	L0115	V	A	305
L0062	VI	E	485	L0116	V	A	275
L0063	IV	E	545	L0117	V	A	215
L0064	VII	E	455	L0118	V	A	245
L0065	VIII	E	455	L0119	VI	A	215
L0066	III	E	545	L0120	III	C	215
L0067	I	D	575	L0121	IV	C	395
L0068	I	D	575	L0122	I	C	485
L0069	I	D	575	L0123	I	C	485
L0070	I	D	455	L0124	I	C	545
L0071	II	D	545	L0125	I	C	485
L0072	II	A	455	L0126	II	C	425
L0073	II	D	215	L0127	II	C	425
L0074	II	D	365	L0128	IV	C	305
L0075	III	D	455	L0129	IV	C	275
L0076	III	C	245	L0130	III	C	275
L0077	III	D	545	L0131	V	C	215
L0078	III	D	545	L0132	IV	C	245
L0079	IV	D	545	L0133	II	C	425
L0080	IV	D	515	L0134	II	C	395
L0081	IV	D	575	L0135	III	C	365
L0082	IV	D	545	L0136	III	C	425
L0083	V	D	575	L0137	I	B	605
L0084	V	D	545	L0138	I	B	575
L0085	V	D	575	L0139	I	B	515
L0086	V	D	545	L0140	I	B	605
L0087	VI	D	545	L0141	II	B	485
L0088	VI	D	545	L0142	II	B	515
L0089	VI	D	575	L0143	II	B	455
L0090	VI	D	545	L0144	II	B	485
L0091	VII	D	575	L0145	III	B	335
L0092	VII	D	515	L0146	III	B	335
L0093	VII	D	575	L0147	III	B	395
L0094	VII	D	545	L0148	III	B	305
L0095	VIII	D	455	L0149	IV	B	245
L0096	VIII	D	455	L0150	IV	B	305
L0097	VIII	D	455	L0151	IV	B	365
L0098	VIII	D	455	L0152	IV	B	365
L0099	I	A	515	L0153	VII	E	575
L0100	I	A	605	L0154	VIII	E	605
L0101	II	A	515	L0170	III	D	545
L0102	II	A	485	L0171	III	D	545
L0103	I	A	545	L0172	V	D	575
L0104	II	A	515	L0173	V	D	575
L0105	II	A	515	L0174	VI	A	185
L0106	I	A	605	L0175	VI	A	215
L0107	III	A	455	L0176	V	C	155
L0108	III	A	455	L0177	V	C	125
L0109	III	A	425	L0178	VI	C	95
L0110	III	A	365	L0179	VI	C	65
L0111	IV	A	395	L0180	VI	C	75
L0112	IV	A	395				

Wytrzymałość zmęczeniowa łopatki, określona na podstawie próby zmęczeniowej, podczas której uzyskano dane o wartości naprężenia i liczbie cykli zmiany naprężenia (rys. 5–7), posłużyła do wyznaczenia (metodą najmniejszych kwadratów) linii trendu. Celem było wskazanie na tendencję do zmniejszania się wytrzymałości zmęczeniowej łopatki w poszczególnych strefach jej pióra.

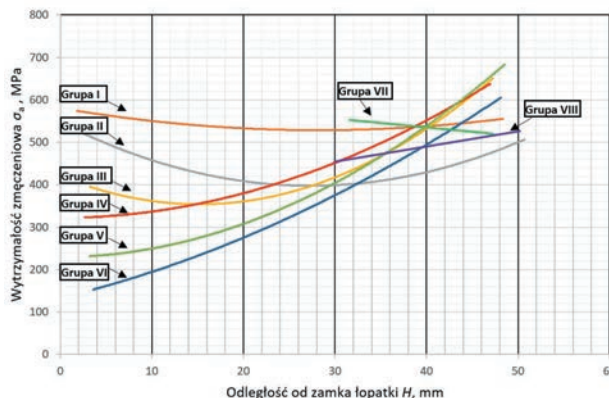
Analiza wyników próby zmęczeniowej pozwoliła również określić stopień oddziaływania uszkodzenia – w zależności od jego położenia na krawędzi natarcia względem podstawy pióra (zamka) – na wytrzymałość zmęczeniową łopatki. Uwzględniono wyniki próby zmęczeniowej łopatek z uszkodzeniami grup I–VIII (rys. 7). Stwierdzono, że uszkodzenia leżące w odległości do 24 mm od podstawy zamka łopatki (strefy A–C) mają największy wpływ na zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej łopatki.



Rys. 5. Średnia wytrzymałość zmęczeniowa łopatki w funkcji długości uszkodzenia – strefa C

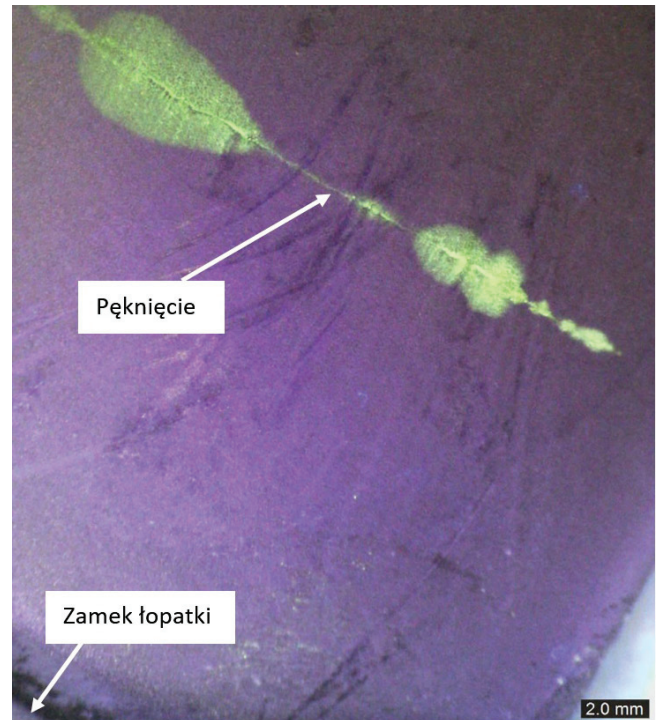


Rys. 6. Średnia wytrzymałość zmęczeniowa łopatek w zależności od długości uszkodzenia – strefy A–E



Rys. 7. Wytrzymałość zmęczeniowa łopatek w funkcji odległości uszkodzenia od zamka – grupy uszkodzeń I–VIII

Badania makroskopowe z zastosowaniem metody fluorescencyjnej umożliwiły obserwację źródła i charakteru inicjacji oraz kierunku propagacji pęknięć zmęczeniowych uszkodzonych łopatek. Stwierdzono, że uszkodzone łopatki po próbie zmęczeniowej charakteryzują się pęknięciami o długości od 6 do 14 mm. Pęknięcia zmęczeniowe najczęściej są zlokalizowane na grzbiecie pióra łopatki. Kierunek propagacji tych pęknięć jest równoległy do podstawy zamka łopatki (rys. 8) [12].



Rys. 8. Obraz pęknięcia na grzbiecie pióra łopatki po próbie zmęczeniowej

Ustalono, że źródło inicjacji pęknięcia zwykle znajdowało się w wierzchołku uszkodzenia (rys. 3) – tak było w przypadku wszystkich łopatek po próbie zmęczeniowej z uszkodzeniami w strefach B i C. Jednocześnie stwierdzono, że pęknięcia na powierzchni grzbietu pióra były inicjowane w jego części środkowej – było to charakterystyczne dla wszystkich łopatek po próbie zmęczeniowej z uszkodzeniami w strefie E (tabl. IV). Pęknięcia powstałe w środkowej części pióra łopatki przebiegały w odległości od 5 do 12 mm od jej zamka.

TABLICA IV. Pęknięcia zmęczeniowe inicjowane w wierzchołku uszkodzenia pióra łopatek w zależności od położenia

Strefa uszkodzenia	Inicjacja pęknięcia w wierzchołku uszkodzenia, %
A	82
B	100
C	100
D	42
E	0

Podsumowanie

Analiza wyników badań pozwoliła ustalić, że długość oraz położenie uszkodzenia łopatki na jej krawędzi natarcia silnie, choć w różnym stopniu, oddziałuje na jej wytrzymałość zmęczeniową. Stwierdzono, że wytrzymałość zmęczeniowa najbardziej zmniejszyła się w przypadku łopatek z uszkodzeniami krawędzi natarcia położonymi

w odległości do 24 mm od podstawy zamka. Uszkodzenia krawędzi łopatki o głębokości 0,1 mm, zlokalizowane w strefach A–C, powodują wyraźny spadek wytrzymałości zmęczeniowej. Z kolei uszkodzenia położone w odległości >24 mm od podstawy zamka mają mały wpływ lub w ogóle nie wpływają na wytrzymałość zmęczeniową pióra łopatek.

Wykazano, że najmniejszą wytrzymałością zmęczeniową charakteryzują się łopatki z uszkodzeniami krawędzi pióra położonymi w odległości od 13 do 24 mm od zamka. Przykładowo uszkodzenie o długości 1,3 mm powoduje zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej do 65 MPa.

Badania makroskopowe po próbie zmęczeniowej łopatek z uszkodzeniami krawędzi pióra położonymi w odległości < 24 mm od zamka wskazują na występowanie tendencji do inicjacji pęknięć zmęczeniowych na grzbiecie pióra łopatki w wierzchołku uszkodzenia krawędzi natarcia. Kierunek propagacji pęknięć jest prostopadły do krawędzi natarcia pióra łopatki.

Przedstawione prace wykonano w ramach projektu Lider (nr LIDER/002/039/L-5/13/NCBiR/2014, pt. „Analiza obrazu w klasyfikacji uszkodzeń łopatek sprężarki silników lotniczych i prognozowanie ich żywotności”), finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

LITERATURA

1. Chen X., Hutchinson J.W. "Particle impact on metal substrates with application to foreign object damage to aircraft engines". *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 50, 12 (2002): s. 2669–2690.
2. Shabaycovitch V. "Competitiveness of products, equipment and technological processes in machine-building". *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 36, 1 (2012): s. 73–80.
3. Kowalewski Z.L. „Zmęczenie materiałów – podstawy, kierunki badań, ocena stanu uszkodzenia”. *Materiały XVII Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”*, Zakopane 2011.
4. Kozakiewicz A. „Analiza uszkodzeń turbinowych silników odrzutowych”. *Prace Instytutu Lotnictwa*. 213, 22 (2011): s. 224–234.
5. Wyrzykowski W.J., Pleszakow E., Sieniawski J. „*Odkształcenie i pękanie metali*”. Warszawa: WNT, 1999.
6. Witek L. "Vibration analysis for detecting failure of compressor blade". *Engineering Failure Analysis*. 25, 1 (2012): s. 211–218.
7. Sieniawski J. „*Kryteria i sposoby oceny materiałów na elementy lotniczych silników turbinowych*”. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 1995.
8. 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.
9. Maslyk M., Obrocki W., Setkiewicz A., Sieniawski J. "Experimental fatigue strength determination of damaged aircraft engine blades". *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 40, 4 (2016): s. 55–65.
10. Zakrzewski M., Zawadzki J. „*Wytrzymałość materiałów*”. Warszawa: PWN, 1983.
11. PN-76/H-04325:1976 Badanie metali na zmęczenie. Pojęcia podstawowe i ogólne wytyczne przygotowania próbek oraz przeprowadzania prób.
12. Nikhamkin N. "Crack propagation in turbojet blades. Experimental technique and results". *International Journal of Fatigue*. 18, 8 (1996): s. 604–610. ■