

## STRESZCZENIE

*Numeryczno-eksperymentalna analiza naprężeń oraz trwałości zmęczeniowej łopatek z uszkodzeniami w zakresie drgań rezonansowych*

Praca doktorska dotyczy numeryczno-eksperymentalnej analizy naprężeń oraz trwałości zmęczeniowej łopatek I-go stopnia sprężarki silnika lotniczego z uszkodzeniami (karb geometryczny i karb powstały na skutek uderzenia twardym obiektem), pracującej w warunkach drgań rezonansowych.

W pracy przeprowadzono analizę bieżącego stanu zagadnienia w zakresie numerycznych i doświadczalnych analiz zmęczeniowych elementów silników lotniczych. Przedstawiono istotę problemu dotyczącego wyznaczania trwałości zmęczeniowej łopatek sprężarki z uszkodzeniami, w ujęciu drgań rezonansowych. W pracy przedstawiono także charakterystykę silników lotniczych (w szczególności łopatek sprężarki) jak i podstawy teoretyczne dotyczące numerycznych analiz zmęczeniowych.

W oparciu o założenia uzyskane na drodze analizy literatury, zaproponowano oryginalne badania doświadczalne. W ramach badań doświadczalnych przygotowano stanowisko badawcze oraz opracowano dwie autorskie metody pomiaru długości szczeliny zmęczeniowej. Następnie przygotowano łopatki z karbem o różnych parametrach (głębokość, lokalizacja, sposób powstania). Łopatki te zostały poddane badaniom zmęczeniowym, których głównym celem było określenie liczby cykli do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego, analiza procesu rozwoju pęknięcia zmęczeniowego oraz trwałości zmęczeniowej.

W kolejnej części pracy opisano budowę modeli numerycznych łopatek oraz zdefiniowano warunki brzegowe. Następnie przeprowadzono numeryczną analizę modalną, w wyniku której określono postacie i częstotliwości drgań własnych łopatki, a także poziom naprężeń.

W kolejnym etapie pracy przygotowano łopatki z karbem geometrycznym oraz przeprowadzono symulację procesu tworzenia karbu z udziałem odkształceń plastycznych. Modele te zostały poddane numerycznej analizie zmęczeniowej. W analizie uwzględniono 8 zmęczeniowych modeli materiału (do analizy  $\epsilon - N$ ) oraz trzy modele umocnienia materiału. W pracy uwzględniono także wpływ korekcji naprężeń średnich oraz doboru rodzaju naprężeń na trwałość zmęczeniową. Ostatecznie wyniki poddano analizie porównawczej. Pracę kończą wnioski końcowe o charakterze ilościowym oraz jakościowym. W ostatnim rozdziale zasugerowano kierunki dalszych badań.

**Słowa kluczowe:** łopaska sprężarki, trwałość zmęczeniowa, karb, drgania rezonansowe, uszkodzenie eksploatacyjne

**ABSTRACT*****Numerical-experimental analysis of stress and fatigue life of compressor blades with damage in resonance vibrations***

The aim of the doctoral dissertation was numerical-experimental modal, stress and fatigue analysis of the I-stage compressor blade with damage (geometric notch and notch caused by foreign object damage - FOD) under resonance vibrations.

The paper analyzes the current state of issues in the field of numerical and experimental fatigue analysis of aircraft engine components. The essence of the problem concerning the determination of fatigue life of compressor blades with damage, in terms of resonance vibrations, is presented. The paper also presents the characteristics of the work and construction of the aircraft engine (in particular compressor blades) as well as the basics of numerical fatigue analysis.

Based on the assumptions obtained by analyzing literature, experimental and numerical studies were designed. As part of the experimental research, a test stand was prepared, the handles fixing the blades and pre-tests regarding the tightening torque of the fixing bolts were carried out. For the needs of the conducted analyzes, two original methods for measuring the length of the fatigue gap were also prepared. For the selected notch parameters (depth, location, nature), a series of notched blades were prepared. These blades were subjected to fatigue tests, the main purpose of which was to determine the number of cycles to initiate fatigue crack, fatigue crack development process, and fatigue life. The results obtained were collected in tables and discussed in this work.

As part of numerical studies, eight fatigue material models (for  $\epsilon$ -N analysis) and three models of material hardening were prepared. Numerical modal analysis was used in order to determine stress distribution during resonance with known amplitude and shape of this form of vibrations. Numerical models were created corresponding to objects used during experimental investigations (geometric notch were prepared and the process of notch forming with plastic deformation (FOD) was simulated). The models were subjected to numerical fatigue analysis. All fatigue and hardening models mentioned above were used. Also, the influence of mean stress correction and selection of stress type on fatigue life were analyzed. In the final part of work, the conclusions were performed.

***Key words:*** *compressor blade, fatigue life, notch, resonant vibrations, FOD*