

## WPŁYW NAPRĘŻEŃ WSTĘPNYCH W OKOLICY WIERZCHOŁKA KARBU NA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ ŁOPATKI SPRĘŻARKI

### Streszczenie

Praca zawiera informacje na temat numerycznej i eksperymentalnej analizy łopatek sprężarki z defektami. Głównym celem pracy jest określenie wpływu naprężeń wstępnych, występujących w okolicy wierzchołka karbu, na trwałość zmęczeniową łopatki. Za pomocą analizy eksperymentalnej określono wpływ rodzaju karbu na trwałość zmęczeniową. Uzyskane wyniki wykorzystano do wyznaczenia zależności pomiędzy rozkładem naprężeń wstępnych a rodzajem uszkodzenia (karbu). Praca uwzględnia dwa rodzaje karbów: karb mechaniczny powstały w wyniku skrawania oraz karb powstały na skutek uderzenia twardym obiektem. Analiza numeryczna posłużyła do określenia rozkładu naprężeń w okolicy wierzchołka karbu. Analiza została przeprowadzona dla dwóch różnych modeli, przy użyciu oprogramowania Ansys Workbench. W pierwszym przypadku, model łopatki zawierał karb typu V (wybranie materiału). Przy użyciu analizy harmonicznej określono rozkład naprężeń w okolicach karbu, dla częstotliwości rezonansowej i amplitudy równej 1,8 [mm]. W przypadku drugiej analizy, zamodelowano numeryczne uszkodzenie łopatki z udziałem odkształceń plastycznych co miało odwzorowywać proces rzeczywistego uszkodzenia łopatki. Celem tej części pracy było określenie wartości i rozkładu naprężeń wstępnych powstałych w łopatce po zderzeniu z obiektem zassanym do sprężarki.

### WPROWADZENIE

Łopatki z silników turbinowych należą do grupy elementów zwanych krytycznymi. Przepływ powietrza wymagany do uzyskania odpowiedniego ciągu samolotu, powoduje tworzenie efektu ssącego, który może unosić i wciągać małe elementy z obszaru wokół silnika. Kolidująca obracająca się łopatka z twardym obiektem (np. kamieniem) jest częstą przyczyną powstawania uszkodzeń na powierzchni tych elementów silnika (rys. 1 i 2). Łopatki sprężarek osiowych pracują w warunkach dużych prędkości obrotowych, sięgających nawet do 40000 RPM. Wspomniana prędkość obrotowa powoduje powstanie dużych sił odśrodkowych. Siły te wywołują powstanie naprężeń promieniowych w całej łopatce. W przypadku łopatek z uszkodzeniami wywołanymi przez kolizję z twardym obiektem - FOD (z ang. Foreign Object Damage) obserwowane jest pojawienie się naprężeń wstępnych, które skutkują skróceniem żywotności danego elementu. Niejednokrotnie, kolizja łopatki z twardym obiektem może spowodować powstanie wysokich naprężeń w okolicy wierzchołka karbu. Uszkodzenia przyspieszają proces zmęczenia materiału.



Rys. 1. Widok uszkodzonej łopatki sprężarki

Analiza awarii łopatek sprężarek była tematem szeregu prac [1, 2, 3, 4, 5, 6]. W wielu publikacjach, autorzy skupiali się na przyczynie powstania uszkodzenia. Analiza awarii niejednokrotnie była sprzężona z analizą numeryczną opartą na metodzie elementów skończonych (MES) lub eksperymentalną analizą mikroskopową. Z prac tych wynika podstawowy wniosek, że pęknięcie inicjowane jest

ze szczytu karbu. Wniosek ten jest powiązany z rozkładem naprężeń w okolicy wierzchołka karbu. Inicjacja i propagacja szczeliny, w ujęciu analizy trwałości zmęczeniowej łopatek sprężarek, została przedstawiona w pracach [4,5,7]. W pracach tych przedstawiono wpływ kilku parametrów karbu i pracy łopatki na trwałość zmęczeniową. Wyniki z prac [1,3,4,5] pokazują metody detekcji pęknięcia. Praca [6] mówi o wpływie parametrów gabarytowych elementów dyskretnych, użytych do utworzenia modelu numerycznego, na uzyskiwane wyniki. Liczba elementów dyskretnych użytych w analizie numerycznej, dla danej łopatki, winna wynosić ponad 17000 dla TET-10 lub 3000 elementów typu HEX-20.



Rys. 2. Powiększony obraz uszkodzonej krawędzi natarcia łopatki sprężarki.

Prezentowane w tej pracy wyniki i wnioski oparte zostały na statycznej i dynamicznej analizie łopatek sprężarki z różnymi rodzajami uszkodzeń. Uzyskane rezultaty mają charakter zarówno naukowy jak i praktyczny. Analiza numeryczna łopatek, przedstawiona w pracy, pokazuje konkretny przypadek wpływu naprężeń wstępnych oraz ich potencjalne skutki.

### 1. ANALIZA EKSPERYMENTALNA

Eksperymentalna część pracy, związana z inicjacją pęknięcia, została przeprowadzona przy użyciu systemu wibracyjnego Unholtz-Dickie UDCO-TA-250 w laboratorium Maszynach Wirnikowych Politechniki Rzeszowskiej. Podczas trwania testu przebadano łopat-

ki z dwoma różnymi typami karbu. W obu przypadkach analizy, amplituda drgań była mierzona przy użyciu skaningowego wibrometru laserowego POLYTEC PSV-H400. Badania zostały przeprowadzone dla dwóch łopatek sprężarki z silnika PZL-10W. W pierwszym przypadku, karb typu V został wykonany poprzez wybranie materiału, na wysokości 3 [mm] od stopki łopatki (rys. 3a). Łopátka z drugiej analizy ma te same parametry geometryczne karbu, z tą różnicą, że karb powstał w wyniku uderzenia twardym obiektem w krawędź natarcia. Taki sposób utworzenia karbu miał na celu zasymulować rzeczywiste uszkodzenie (rys. 3b) pojawiające się na łopatce. W obu przypadkach badania, karb miał głębokość 0,5 [mm]. Intensywność wymuszenia, w trakcie prób, wynosiła 10g (1g jest równe przyspieszeniu ziemskiemu,  $9,81[m/s^2]$ ). Amplituda przemieszczeń wierzchołka łopatki wynosiła 1,8 [mm]. W trakcie badań eksperymentalnych analizowano tylko pierwszą postać drgań rezonansowych, która ma charakter giętny. Drgania giętne powodują oscylację naprężeń, co w rezultacie wywołuje zmęczenie materiału łopatki. Po określonej liczbie cykli zaobserwowano inicjację pęknięcia.

Wyniki eksperymentu zostały zestawione w tabeli 1. Tabela ta zawiera informacje na temat liczby cykli niezbędnych do inicjacji pęknięcia. W obu przypadkach, łopátka była badana w warunkach amplitudy przemieszczeń równej 1,8 [mm]. Różnica pomiędzy kolejnymi łopatkami wynika z natury powstania karbu. W przypadku łopatki uszkodzonej poprzez wybranie materiału, inicjację pęknięcia zaobserwowano po liczbie cykli  $N = 0,144 \times 10^6$ . Dla porównania, w przypadku łopatki uszkodzonej poprzez uderzenie twardym obiektem, test został przerwany po ponad 40 milionach cykli obciążeń, bez powstania szczeliny. Uzyskane wyniki zostały wykorzystane do określenia wpływu naprężeń wstępnych na trwałość zmęczeniową.

Tab. 1. Wyniki badań eksperymentalnych

Rodzaj uszkodzenia	Poprzez wybranie materiału	Poprzez uderzenie twardym obiektem
Amplituda przemieszczeń szczytu łopatki	A = 1,8 [mm]	A = 1,8 [mm]
Liczba cykli do inicjacji pęknięcia	144 000	Ponad 40 000 000

## 2. ANALIZA NUMERYCZNA

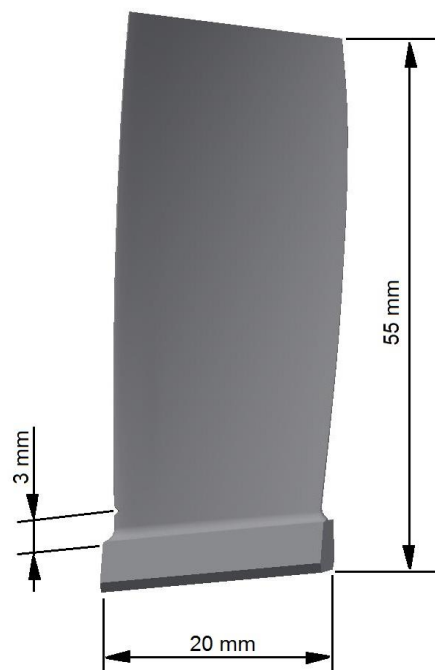
Obiektem badań jest łopátka pierwszego stopnia sprężarki osiowej silnika turbinowego PZL-10W. Model geometryczny łopatki powstał w oparciu o rysunek wykonawczy. Model wykonano przy użyciu oprogramowania Inventor Professional 2015. Model geome-

tryczny został zaimportowany do oprogramowania Ansys Workbench 14, w którym przeprowadzono analizy numeryczne.

Analiza została przeprowadzona w oparciu o dane materiałowe, uzyskane na podstawie statycznej próby jednoosiowego rozciągania dla stali, z której była wykonana łopátka. Skład procentowy stopu EI-961 wynosi: 11% Ce; 1,6% W; 1,5% Ni; 0,35% Mo; 0,18% V; 0,11% C; 0,03% P; 0,025% S. Gęstość stopu EI-961 jest równa  $7850 [kg/m^3]$ . Powyższa stal cechuje się własnościami materiałowymi (określonymi dla temperatury  $20[^\circ C]$ ):

- Wytrzymałość na rozciąganie -  $R_m = 1050 [MPa]$
- Granica sprężystości -  $R_e = 850 [MPa]$
- Moduł Young'a -  $E = 200 [GPa]$
- Współczynnik Poissona -  $\nu = 0,3$

W analizie numerycznej użyto modelu materiału sprężysto-plastycznego.

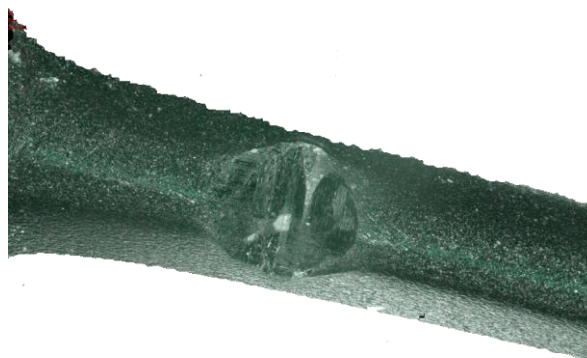


Rys. 4. Model geometryczny łopatki z karbem użyty w pierwszej analizie

Analiza numeryczna została przeprowadzona dla dwóch różnych modeli łopatki, uwzględniających naturę karbu. Pierwszy model (rys. 4) zawierał wykonany karb. Łopátka ta została poddana analizie harmonicznej w celu określenia rozkładu naprężeń w okoli-



a)

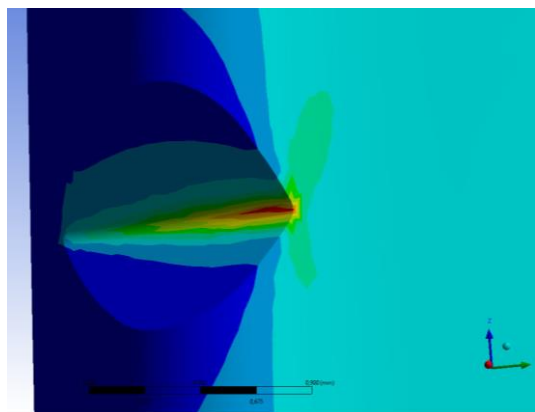


b)

Rys. 3. Widok dwóch różnych karbów na krawędzi natarcia: a) utworzonego przez wybranie materiału, b) utworzonego poprzez uderzenie

cach wierzchołka karbu (rys. 5). Analizowana łopatką działała w warunkach drgań giętych o maksymalnej amplitudzie przemieszczeń równej 1,8 [mm].

Powyższa analiza została oparta na założeniu, że w przypadku takiego zamodelowania karbu, nie wystąpią naprężenia wstępne. Maksymalne naprężenia zredukowane uzyskane w trakcie analizy harmonicznej, są zlokalizowane w okolicy wierzchołka szczytu karbu i wynoszą 915 [MPa]. Wartość ta jest zbliżona do wartości granicy plastyczności dla tego materiału.



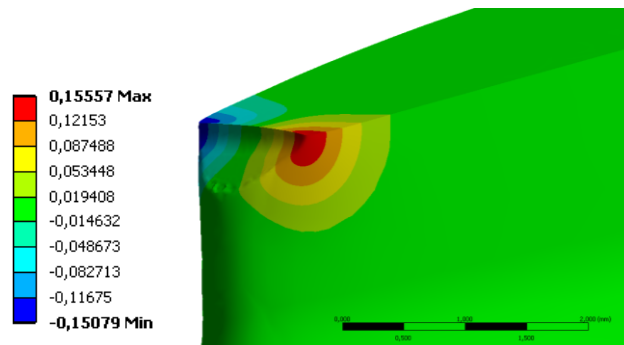
**Rys. 5.** Rozkład naprężeń zredukowanych w okolicy wierzchołka karbu, dla zginanej łopatkę sprężarki (amplituda przemieszczeń  $A=1,8$  [mm]), [MPa]

W celu określenia efektu odkształcenia plastycznego na rozkład naprężeń zredukowanych w łopatkę uszkodzonej poprzez uderzenie, przygotowano analizę dwustopniową. Pierwszy krok polegał na wgniataniu twardego obiektu w krawędź natarcia łopatkę sprężarki. Materiał łopatkę zamodelowano jako sprężysto-plastyczny. Dodatkowo zdefiniowano kontakt z tarcie (frictional contact) pomiędzy klinem (o kształcie przyszłego karbu) a łopatkę. W drugim kroku klin został wycofany, w ten sposób określono wartości naprężeń wstępnych i odkształceń plastycznych.

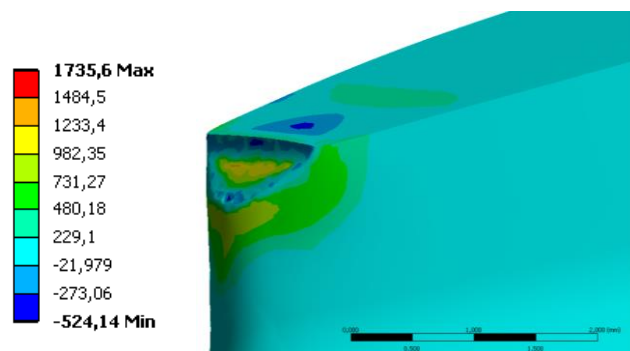
W wyniku wgniatania, zaobserwowano wypłynięcie materiału (rys. 6) po obu stronach łopatkę. Maksymalne przemieszczenia na kierunku osi Y (rys. 7) są równe 0,155 [mm]. Uzyskany kształt karbu odpowiada kształtowi uzyskanemu w trakcie analizy eksperymentalnej (rys. 3b). Wypłynięcie materiału powstało na wskutek uplastycznienia materiału w obszarze kontaktu. Odkształcenie plastyczne spowodowało umocnienie materiału i powstanie naprężeń ścisających w okolicach wierzchołka karbu co wpływa na zwiększenie wytrzymałości tego elementu. Dodatkowo, wypłynięcie boczne materiału powoduje lokalne zwiększenie szerokości łopatkę (o około 0,3 [mm]). W rezultacie, w trakcie zginania, pomimo dużych sił

działających na łopatkę, naprężenia będą mniejsze.

Z punktu widzenia zmęczenia materiału, najważniejsze są naprężenia powstałe na powierzchni wierzchołka karbu, ponieważ to tam powstanie szczelina (inicjacja pęknięcia). W celu określenia rozkładu naprężeń wstępnych przygotowano kilka obrazów przedstawiających następujące rozkłady: maksymalne naprężenia główne ( $\sigma_1$ , rys. 8), minimalne naprężenia główne ( $\sigma_3$ , rys. 9) oraz naprężenia wzdłuż osi Z –  $\sigma_z$  (rys.10).



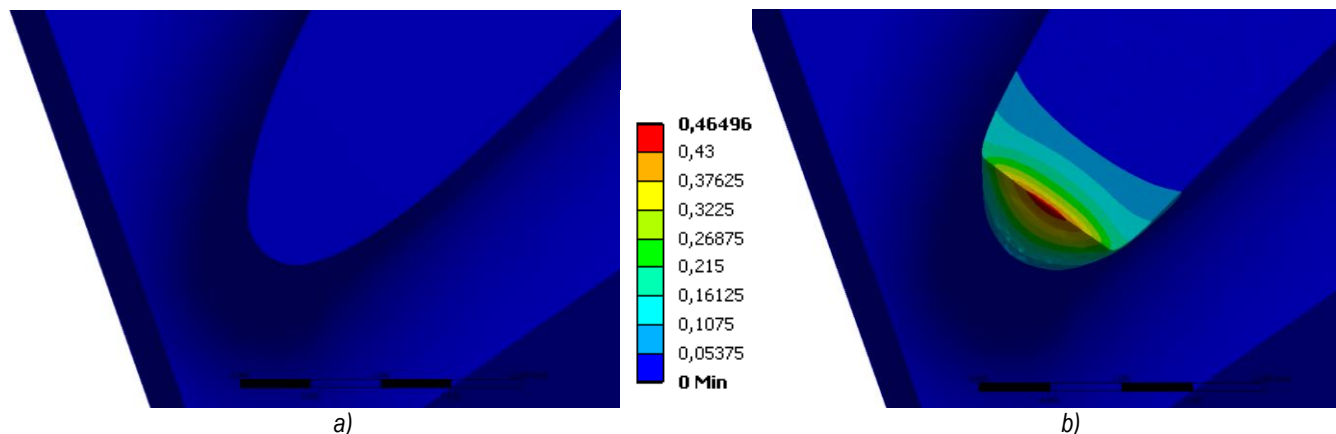
**Rys. 7.** Przesunięcia kierunkowe na osi Y, [mm]



**Rys. 8.** Maksymalne naprężenia główne  $\sigma_1$ , [MPa]

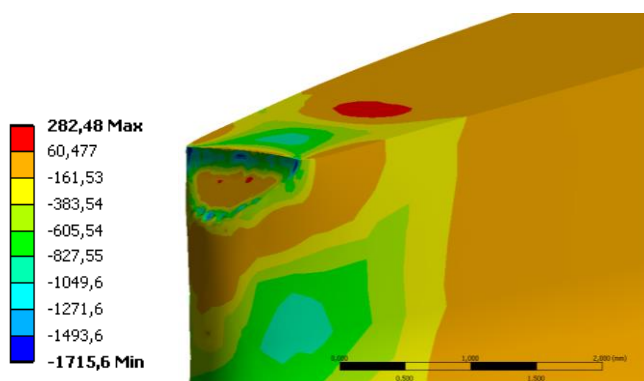
Zakres maksymalnych naprężeń głównych  $\sigma_1$  (rys. 8) to od -524 do 1735 [MPa]. Najważniejsza jest informacja na temat wartości naprężeń w okolicach wierzchołka karbu (0 [MPa]). Maksymalna wartość jest zaobserwowana lokalnie na powierzchni wewnętrznej karbu. Wynik ten może być wywołany dużymi wymiarami objętościowymi elementu dyskretnego. Na tym etapie analizy, uzyskane wyniki mają charakter wstępny.

W przypadku minimalnych naprężeń głównych -  $\sigma_3$  (rys. 9), uzyskano wartości z zakresu od -1715 do 282 [MPa]. W okolicy wierzchołka karbu zaobserwowano naprężenia ścisające o wartościach około -1000 [MPa].

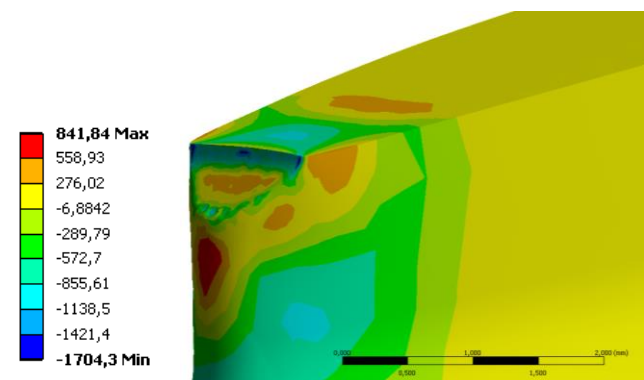


**Rys. 6.** Rozkład przemieszczeń całkowitych w przekroju poprzecznym łopatkę przed (a) i po symulacji uszkodzenia twardym obiektem (b), [mm]





Rys. 9. Minimalne naprężenia główne  $\sigma_3$ , [MPa]



Rys. 10. Naprężenia wzdłuż osi Z –  $\sigma_z$ , [MPa]

Na brzegu wierzchołka karbu, wartości naprężeń osiągają wartość -1715 [MPa]. Jednocześnie, miejsce wystąpienia wspomnianych naprężeń ściskających jest jednocześnie miejscem wystąpienia maksymalnych naprężeń uzyskiwanych podczas zginania łopatk. W oparciu o powyższą zależność lokalizacji naprężeń można stwierdzić, że trwałość zmęczeniowa powinna wzrosnąć (ze względu na naprężenia ściskające przeciwdziałające pękaniu materiału w wyniku rozciągania). Podobny rozkład naprężeń i wartości można zaobserwować analizując naprężenia na kierunku osi Z –  $\sigma_z$  (rys. 10).

## WNIOSKI

Dla łopatki z karbem uzyskanym poprzez wybranie materiału, naprężenia wstępne nie występują ze względu na brak uplastycznienia materiału. Jednocześnie, można stwierdzić, że w trakcie zginania łopatki z karbem, największe wartości naprężeń są w okolicach wierzchołka karbu. Miejsce to będzie jednocześnie ogniskiem pęknięcia w trakcie badań zmęczeniowych w warunkach rezonansu. W trakcie analizy numerycznej określono maksymalną wartość naprężeń zredukowanych 915 [MPa]. Wartość ta jest zbliżona do granicy plastyczności materiału EI961. Takie wartości naprężeń spowodują szybkie powstanie pęknięcia i jego dalszą propagację. Karb mechaniczny powoduje zmniejszenie trwałości zmęczeniowej łopatki. Naprężenia wstępne powstałe w łopatce uszkodzonej poprzez uderzenie twardym obiektem wpływają na trwałość zmęczeniową. Wywołane jest to zarówno umocnieniem materiału jak i powstaniem naprężeń ściskających w obszarze wierzchołka karbu, czyli miejsca, w którym powstaje szczelina.

W oparciu o kształt drgań giętych łopatki w trakcie obu analiz oraz w oparciu o amplitudę przemieszczeń wierzchołka łopatki, można sformułować wniosek, że naprężenia wstępne w okolicy wierzchołka karbu mają duży wpływ na zwiększenie trwałości zmęczeniowej łopatki.

## BIBLIOGRAFIA

1. Kermanpur A., Sepehri A.H., Ziaei-Rad S., et al. Failure analysis of Ti6Al4V gas turbine compressor blades, Eng. Failure Analysis, Vol. 15, pp. 1052–1064, 2008.
2. Lourenço N.J., Graça M.L.A., Franco L.A.L., Silva O.M.M., Fatigue failure of a compressor blade, Eng. Failure Analysis, Vol. 15, pp. 1150–1154, 2008.
3. Madhavan, S., Jain, R., Sujatha, C., Sekhar, A.S., Vibration based damage detection of rotor blades in a gas turbine engine, Engineering Failure Analysis, Vol. 46, pp. 26-39, 2014.
4. Troshchenko V.T., Prokopenko A.V., Fatigue strength of gas turbine compressor blades, Engineering Failure Analysis, Vol. 7, pp. 209-220, 2000.
5. Witek L., Fatigue Investigations of the Compressor Blades with Mechanical Defects, Key Engineering Materials, Vol. 598 pp. 269-274, 2014.
6. Witek L., Bednarz A., Numeryczno-eksperymentalna analiza naprężeń oraz drgań własnych łopatki sprężarki silnika turbiny, Logistyka 6, pp.11177-11186, 2014.
7. Witoś M., On the modal analysis of a cracking compressor blade, Research works of AFIT 23, pp. 21-36, 2008.

## INFLUENCE OF INITIAL STRESS AFTER IMPACT OF HARD OBJECT FOR FATIGUE LIFE OF THE COMPRESSOR BLADE

### Abstract

*In this paper the experimental and numerical results of static and dynamic analysis of the compressor blade with defects were presented. The main goal of this work is the analysis of the initial stress distribution around the top of different types of the notch to find its impact on fatigue life of compressor blade. The experimental analysis is carried out to determine the effect of notch type on blade fatigue life. Results obtained in experiment was used to find the relations between initial stress distribution and defect type. In this paper two types of the notch are took into the consideration: first made by machining and second caused by impact. The numerical analysis was used to find the stress distribution around the top of the notch. The numerical computations was carried out for two different models by using ANSYS Workbench software. In the first model, where V-notch have been included, harmonic response analysis was used to get the stress distribution around the top of notch for bending blade with amplitude 1.8 mm. In second model, notch was created by impact of hard object to simulate the conditions of real blade damage. Main goal of this part of work is to determine the initial stress distribution after impact.*

Autorzy:

mgr inż. **Arkadiusz BEDNARZ** – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Samolotów i Silników Lotniczych, abednarz@prz.edu.pl

mgr inż. **Łukasz BĄK** – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Przeróbki Plastycznej, lbak@prz.edu.pl

mgr inż. **Evgeniy BOLTYNJUK** – Saint Petersburg State University, boltynjuk@gmail.com