

Analiza wpływu wybranych parametrów geometrycznych na właściwości wytrzymałościowe zamka łopatki sprężarki osiowej

Influence of selected geometric parameters on strength properties of compressor's jet engine blade joint

ADAM KOZAKIEWICZ
OLGA GRZEJSZCZAK *

Materiały z XX SKWPIE, Jurata 2016 r.
DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.151

Elementy wirujące są najbardziej obciążonymi częściami silników turbinowych. Prawidłowo dobrane parametry geometryczne zamka pozwalają na obniżenie naprężeń i w efekcie na zwiększenie bezpieczeństwa użytkowania silnika. W pracy przedstawiono metodykę obliczeń zamka trapezowego łopatki sprężarki odśrodkowej. Obliczenia przeprowadzono metodą elementów skończonych na modelowym zamku z wykorzystaniem pakietu Ansys. Pokazano wpływ wybranych parametrów geometrycznych na naprężenia i odkształcenia zamka. **SŁOWA KLUCZOWE:** analiza naprężeń, zamek sprężarki osiowej, zamek trapezowy, optymalizacja

Rotating parts are the most loaded ones of jet engines. Geometry optimization of blade joint has to be performed in order to decrease stress and displacement. In the paper optimization methodology of compressor's blade dovetail joint was presented. Strength analysis was performed on model dovetail joint using finite element method and Ansys software. Influence of selected geometrical parameters on stress and displacement of the joint was discussed.

KEY WORDS: stress analysis, compressor's blade joint, dovetail joint, optimization

Sposób połączenia łopatki z tarczą ma kluczowe znaczenie dla pracy całego zespołu wirnikowego sprężarki, a także żywotności całego silnika. Część łopatki służąca do połączenia z wieńcem tarczy nazywa się zamkiem lub stopką. Istnieje wiele różnych kształtów stopki i wiele sposobów łączenia łopatek z tarczami [4]. Możemy wyróżnić m.in. połączenia wałeczkowe, prostokątne, trapezowe i sworzniowe. Połączenie musi zapewnić przeniesienie obciążeń od działających sił odśrodkowych, obciążeń gazowych, obciążenia wibracyjnego itd. Obciążenia przekazywane są z łopatki na zamek, a następnie z zamka na tarczę lub powłokę wirnika bębnowego. Stąd też wymiary i kształt zastosowanego połączenia mają istotny wpływ na rozkład naprężeń w całym stopniu wirnikowym.

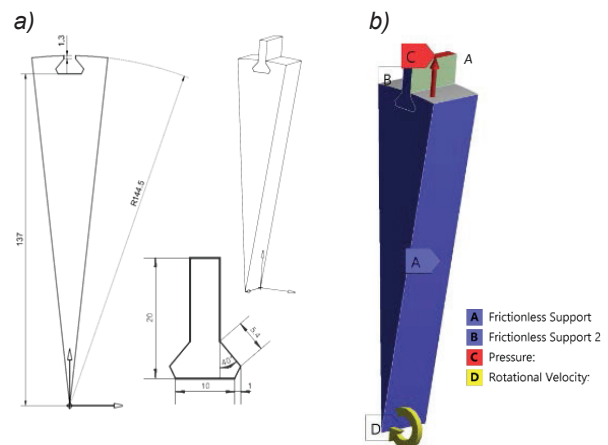
Najpopularniejszym typem połączenia stosowanego w wirnikach sprężarek jest zamek trapezowy (zwany także „jaskółczym ogonem”, z ang. *dovetail*) o przekroju zbliżonym do trapezu równoramiennego. Na zamek działają siły odśrodkowe pochodzące od masy łopatki oraz siły aerodynamiczne działające na pióro łopatki. Siły odśrodkowe odpowiadają za rozciąganie zamka i docisk do powierzchni nośnych tarczy lub bębna oraz za zginanie i skręcanie. Siły aerodynamiczne powodują zaś zginanie i skręcanie zamka.

Zagadnienie numerycznej analizy naprężeń połączenia zamkowego z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) można znaleźć m.in. w pracach [1÷3]. Ponieważ zamek trapezowy jest najczęściej stosowanym rodzajem

połączenia w przypadku wentylatorów i sprężarek silników lotniczych, dlatego też w niniejszej pracy skupiono się na analizie wytrzymałościowej właśnie takiego rodzaju połączenia. Głównym celem pracy jest określenie naprężeń powstających podczas pracy na powierzchniach kontaktowych zamka łopatki i tarczy oraz analiza wpływu wybranych parametrów geometrycznych na rozkład tych naprężeń.

Analiza numeryczna zamka trapezowego

Uproszczony model geometryczny zamka trapezowego oraz cała analiza numeryczna MES została wykonana w oprogramowaniu Ansys 16.2. Główne wymiary geometryczne opracowanego modelu zamka łopatki i tarczy przedstawia rys. 1a. Przyjęto, że model wykonany jest ze stopu tytanu o następujących właściwościach: module Younga $E = 90$ GPa, liczbie Poissona $\nu = 0,36$ i gęstości $\rho = 4620$ kg/m³. Powierzchnie styku w rejonie zamka zdefiniowane są za pomocą elementów typu *contact*, na których współczynnik tarcia przyjęto $\mu = 0,25$.



Rys. 1. Geometria zamka trapezowego (a) oraz model zdefiniowanych obciążeń (b)

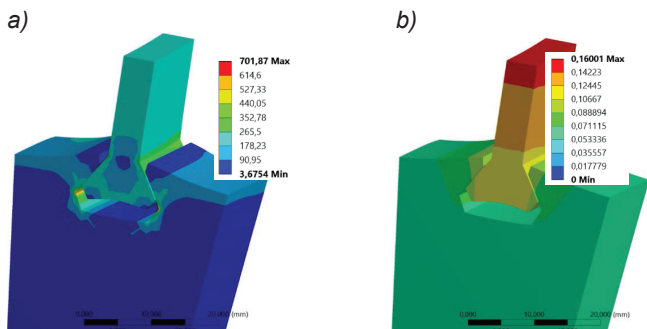
Do stworzenia modelu dyskretnego wykorzystano elementy skończone typu hexahedron (elementy sześciennie). Utworzona siatka elementów skończonych zawiera 40 865 węzłów i 9616 elementów.

Warunki brzegowe zdefiniowano poprzez podparcie przesuwnie typu *Frictionless Support*. Podparcie to nakłada ograniczenia na kierunku normalnym do wybranej powierzchni. Analizowana konstrukcja obciążona jest siłami bezwładności realizowanymi poprzez zadaną prędkość obrotową względem osi Z, a także równomiernie rozłożonym na górnej powierzchni stopki ciśnieniem o wartości 195 MPa (rys. 1b). Maksymalna prędkość obrotowa przyjęta do obliczeń wynosi 1151,9 rad/s (11 000 obr/min). Ponieważ rozpatrywany jest element

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

sprężarki niskiego ciśnienia, gdzie wpływ temperatury jest nieznaczny, obciążenia cieplne zostały pominięte.

Analizę wytrzymałościową przeprowadzano dla przypadku, w którym jednocześnie działają wszystkie zdefiniowane obciążenia. Rozkład naprężeń zredukowanych (*von Mises stresses*) i odkształceń (*total deformation*) analizowanego połączenia przedstawia rys. 2.



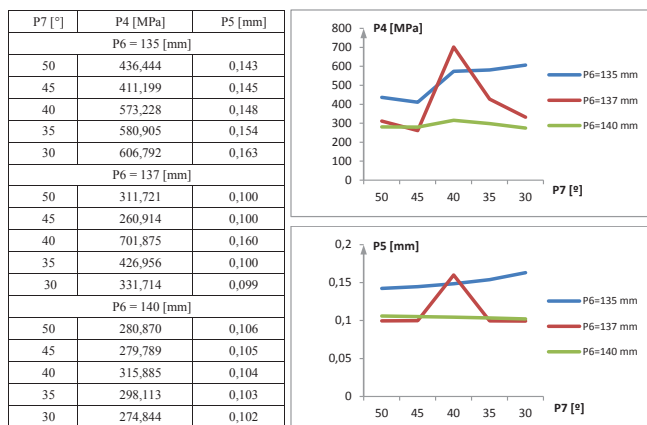
Rys. 2. Rozkład naprężeń zredukowanych (a) i odkształceń (b) zamka

Analiza parametryczna modelu

Na pracę konstrukcji wpływa wiele różnych parametrów i własności. Analiza parametryczna pozwala prześledzić wpływ tych parametrów na daną wielkość, oszczędzając czas, przy jednoczesnym uzyskaniu dużej wariacji rozwiązań. Można badać np. wpływ własności materiałowych czy warunków brzegowych na zachowanie konstrukcji, jednak największym źródłem różnorodności rozwiązań są zmiany w wymiarach geometrii. Oprogramowanie Ansys umożliwia tworzenie sparametryzowanej geometrii – poprzez przygotowanie modelu od początku w tym środowisku albo poprzez wczytanie gotowej geometrii wraz z importem własności, materiałów itp. z innych systemów CAD. Analizowany model zamka trapezowego został całkowicie wykonany w systemie Ansys. Już na etapie tworzenia geometrii zdefiniowane zostały parametry geometryczne, których zmiany na dowolnym etapie analizy pozwolą pokazać ich wpływ na pracę całego połączenia. W tym przypadku badany jest wpływ dwóch parametrów geometrycznych: kąta zamka i odległości łopatki od osi obrotu na rozkład naprężeń i odkształceń zamka o wymiarach przedstawionych na rys. 1a.

Zmiana kąta zamka (zmiana parametru P7)

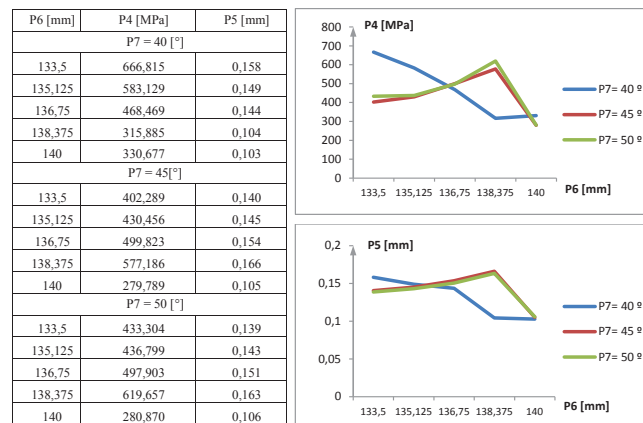
Początkowa wartość parametru P7 wynosiła 40°. W tej analizie wielkość ta zmieniała się w zakresie od 30 do 50°. Obliczenia zostały wykonane dla trzech różnych wartości parametru P6, wynoszących kolejno: 135, 137 i 140 mm. Otrzymane wyniki przedstawia rys. 3.



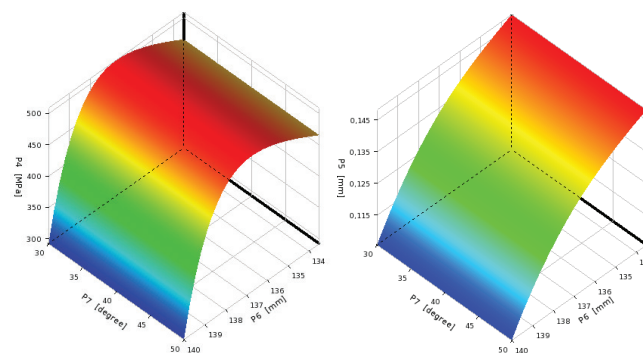
Rys. 3. Rozkład naprężeń zredukowanych (P4) i przemieszczeń (P5) dla różnych wartości kąta zamka (P7)

Zmiana odległości łopatki od osi obrotu (zmiana parametru P6)

Parametr P6 charakteryzuje odległość dolnej krawędzi stopki od środka tarczy. Wpływ zmiany tej odległości na naprężenia przedstawia rys. 4. Obliczenia zostały wykonane dla wartości P6 zawierających się w przedziale od 133,5 do 140 mm.



Rys. 4. Rozkład naprężeń zredukowanych (P4) i przemieszczeń (P5) dla różnych wartości parametru P6



Rys. 5. Rozkłady parametrów P4 i P5 dla różnych wartości P6 i P7

Podsumowanie i wnioski

Wykonane analizy pokazały, jak duży wpływ na wytrzymałość połączenia łopatka–tarcza mają parametry geometryczne zamka. Przy niezmiennych własnościach mechanicznych i warunkach obciążenia niewielkie zmiany kąta zamka i odległości łopatki od osi obrotu powodowały w analizowanym przypadku zmianę naprężeń w przedziale 300÷500 MPa, a odkształcenia – 0,103÷0,158 mm. Zmieniając parametry geometryczne, uzyskano prawie dwukrotne zmniejszenie naprężeń przy jednoczesnym zmniejszeniu przemieszczenia zamka. Prawidłowy dobór parametrów geometrycznych pozwala na znaczne zmniejszenie naprężeń i w konsekwencji na wydłużenie żywotności elementów.

LITERATURA

- Dźygadło Z. „Napędy lotnicze. Zespoły wirnikowe silników turbinowych”, WKiŁ, 1982.
- Merquid S. A. „Theoretical and experimental studies of structural integrity of dovetail joints in aeroengine discs”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 56, No. 1÷4, pp. 668÷677.
- Papanikos P. „Three-dimensional nonlinear finite element analysis of dovetail joints in aeroengine discs”, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 29, No. 3÷4, pp. 173÷186.
- Anandavel K., Prakash R.V. „Effect of three-dimensional loading on macroscopic fretting aspects of an aero-engine blade-disc dovetail interface”, *Tribology International*.
- Lipka J. „Wytrzymałość maszyn wirnikowych”, WNT, 1967.