

# Numeryczno-doświadczalna analiza połączenia zamkowego z uwzględnieniem parametryzacji modelu

## Numerical and experimental analysis of compressor's jet engine blade joint including the model parameterization

ADAM KOZAKIEWICZ  
OLGA GRZEJSZCZAK  
TOMASZ ŁĄCKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.7.73>

Prezentowano analizę wytrzymałościową trzech wariantów zamka trapezowego, których końcowa geometria powstała z wykorzystaniem modułu optymalizacji systemu ANSYS. Wprowadzono parametryzację geometrii stopki i wieńca tarczy, wykonano analizę porównawczą wytypowanych geometrii pod względem wytrzymałościowym. Zaprezentowano wyniki prób zastępczych modeli odwzorowujących połączenie zamkowe łopatki z wieńcem tarczy, do badań wykorzystano system cyfrowej korelacji obrazu.

**SŁOWA KLUCZOWE:** parametryzacja, optymalizacja, analiza wytrzymałościowa, zamek trapezowy, silnik turbinowy

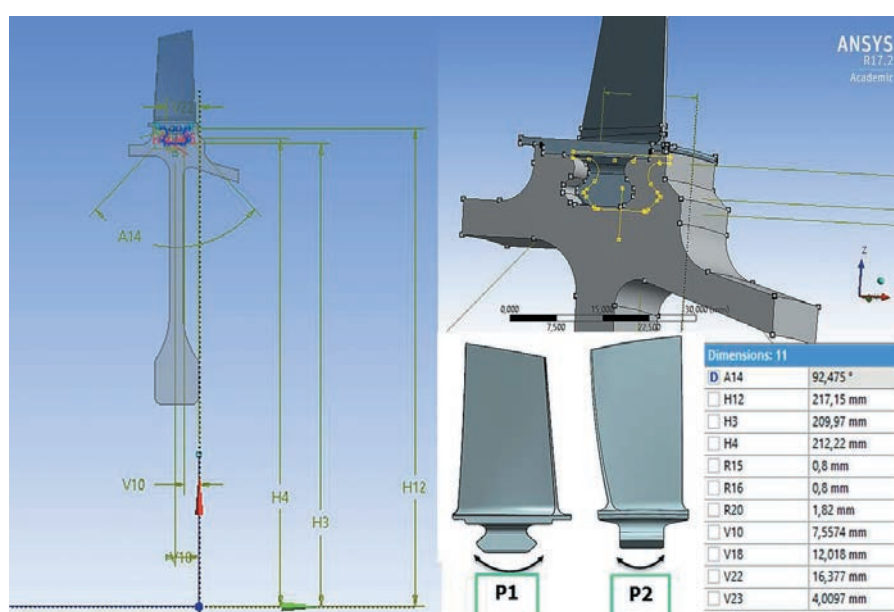
*Presented is the strength analysis of three variants of the compressor's jet engine blade joint whose final geometry was created using the ANSYS optimization module. Parameterization of the blade foot and rim geometry has been introduced and a comparative analysis of the selected geometry in terms of strength has been performed. In addition, results from the experimental analysis of the substitute models of blade joint with using the digital image correlation system were presented.*

**KEYWORDS:** stress analysis, parameterization, dovetail joint, optimization, jet engine

Parametryzacja, czyli wprowadzenie do modelu geometrycznego zmiennych, pozwala efektywnie prześledzić wpływ wybranych parametrów na pracę i zachowanie danej konstrukcji. Poza tym przyspiesza obliczenia modelu i umożliwia wprowadzanie zmian na każdym etapie projektowania. W połączeniu z procesem optymalizacji umożliwia opracowanie wielu wariantów konstrukcji (o różnych wymiarach geometrycznych i cechach) oraz wybór najlepsze-

go rozwiązania w zależności od kryterium optymalizacyjnego. Obliczenia mogą być wykonywane automatycznie, w stosunkowo krótkim czasie, co sprawia, że proces projektowo-konstrukcyjny jest znacznie wydajniejszy.

Przedmiotem pracy jest analiza porównawcza trzech wariantów obliczeniowych, określonych na podstawie odwzorowanej i sparametryzowanej geometrii zamka trapezowego wirnika sprężarki silnika turbinowego z wykorzystaniem narzędzi optymalizacyjnych systemu ANSYS. Na pierwszym etapie wykonano numeryczne analizy wytrzymałościowe metodą elementów skończonych, aby otrzymać rozkłady naprężeń i przemieszczeń przy obciążeniu siłą odśrodkową. Na kolejnym etapie układ połączenia łopatka-tarcza poddano próbie wytrzymałościowej na rozciąganie. Wykorzystano system cyfrowej korelacji obrazu Dantec Q400, pozwalający na pomiar odkształceń i zobrazowanie deformacji rzeczywistej powierzchni.



Rys. 1. Geometria modelu wyjściowego

\* Dr hab. inż. Adam Kozakiewicz (adam.kozakiewicz@wat.edu.pl), mgr inż. Olga Grzejszczak (olga.grzejszczak@wat.edu.pl), mgr inż. Tomasz Łącki (tomasz.lacki@wat.edu.pl) – Wydział Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej

## Analiza numeryczna

Oprogramowanie ANSYS umożliwia definiowanie zarówno zmiennych, jak i więzów geometrycznych na etapie tworzenia geometrii. Skutecznym narzędziem w systemie ANSYS DesignXplorer, pozwalającym na analizę zmienności interesującego parametru w odniesieniu do parametrów wejściowych, jest funkcja *Response Surface*. Określając zakres zmienności wybranych parametrów, można w ramach tej funkcji pozwolić, żeby program losowo wybrał kilka kombinacji tych parametrów, lub samemu wprowadzić wartości. Tak otrzymuje się kilka lub kilkadziesiąt wariantów modelu z odpowiadającymi mu wartościami maksymalnych naprężeń, odkształceń itp. Uzyskane dane można poddać dalszej analizie z zastosowaniem narzędzia *Response Surface Optimization*. Wykorzystuje ono wybraną metodę optymalizacji i poszukuje oraz wybiera wartości, które najlepiej spełniają założone kryteria.

Objektem badań jest zamek trapezowy obwodowy, który jest najczęściej stosowany jako rodzaj połączenia łopatkki z tarczą w wirnikach sprężarek osiowych. Wyjściowa geometria stopki została odwzorowana z wykorzystaniem metod inżynierii odwrotnej. Model CAD stworzono w programie Siemens NX. Do celów parametryzacji geometrii stopki i części wieńcowej tarczy wykonano bezpośrednio w środowisku ANSYS (rys. 1).

Spośród kilkunastu parametrów geometrycznych do dalszej analizy wybrano:

- parametr P1 – grubość stopki definiowaną przez kąt A14 (rys. 1, lewa strona),
- parametr P2 – szerokość stopki (rys. 1, prawa strona).

Przeanalizowano wpływ tych parametrów na naprężenia i przemieszczenia w zamku przy obciążeniu siłą bezwładności, wynikającą z założonej prędkości obrotowej. Przeanalizowano 30 wariantów. Parametr P1 zmieniał się w granicach  $86 \div 98^\circ$ , natomiast parametr P2 – w przedziale  $1,26 \div 1,6^\circ$ . Wyniki przedstawiono na rys. 2. Na kolejnym etapie analizy na podstawie optymalizacji wybrano dwa

TABLICA I. Warianty geometryczne połączenia

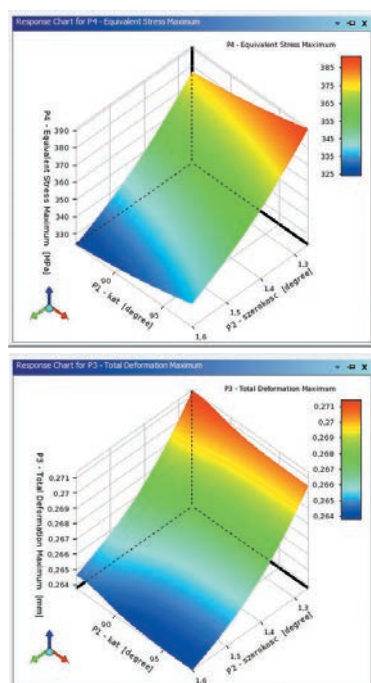
Parametr	Kryterium MIN			Kryterium MAX		
	W1	W2	W3	W4	W5	W6
P1, °	86	95,3	98	98	86,60	93,74
P2, °	1,60	1,59	1,60	1,26	1,26	1,26
Odkształcenia, mm	0,27	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27
Naprężenia, MPa	323,99	334,60	337,15	391,20	377,27	383,69

warianty geometryczne badanej stopki (tabl. I). Pierwszy spełniał kryterium minimalnych naprężeń i odkształceń (MIN), drugi – kryterium maksymalnych naprężeń i odkształceń (MAX).

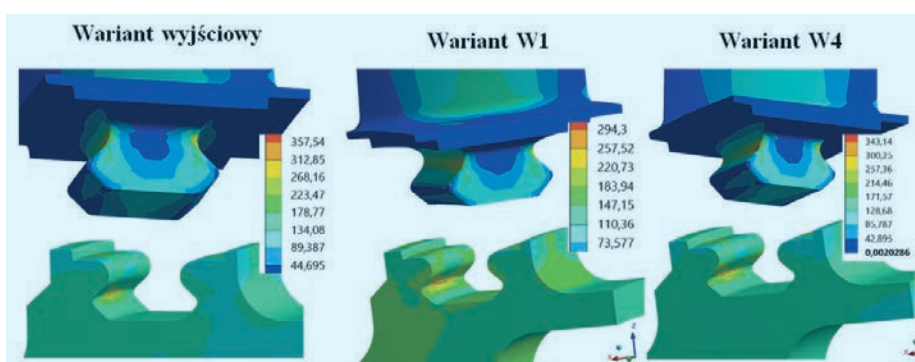
Dalsze analizy numeryczne i analizę doświadczalną przeprowadzono dla wariantów geometrycznych oznaczonych w tabl. I jako W1 i W4. Dla porównania przeanalizowano także geometrię wyjściową. Wyniki analizy wytrzymałościowej, obejmującej numeryczne wyznaczenie rozkładu naprężeń zredukowanych i odkształceń, przedstawiono na rys. 3 i 4.

## Analiza doświadczalna

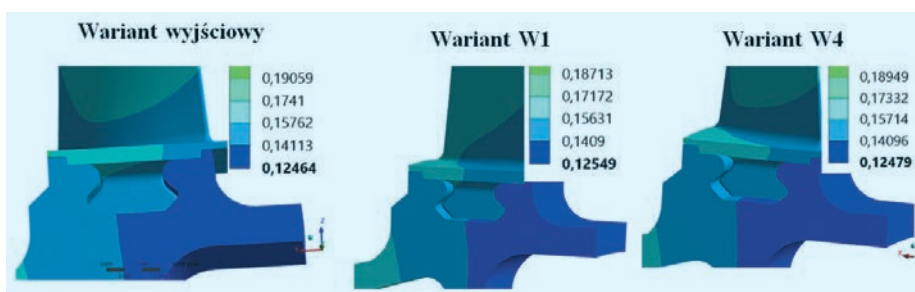
Analiza doświadczalna obejmowała statyczną próbę rozciągania próbek zamka trapezowego i pomiar odkształceń przy zadanym obciążeniu, zmieniającym się od 0,5 do 10 kN. Do wyznaczenia pól odkształceń i deformacji powierzchni badanego obiektu wykorzystano system cyfrowej korelacji obrazu. Zasada działania tego systemu polega na oświetleniu oraz analizie intensywności światła odbitego od powierzchni obiektu w stanie niezdeformowanym (początkowym) i zdeformowanym (rys. 5) [1].



Rys. 2. Wpływ parametrów P1 i P2 na rozkład naprężeń zredukowanych i odkształceń przy prędkości obrotowej  $\omega = 927$  rad/s



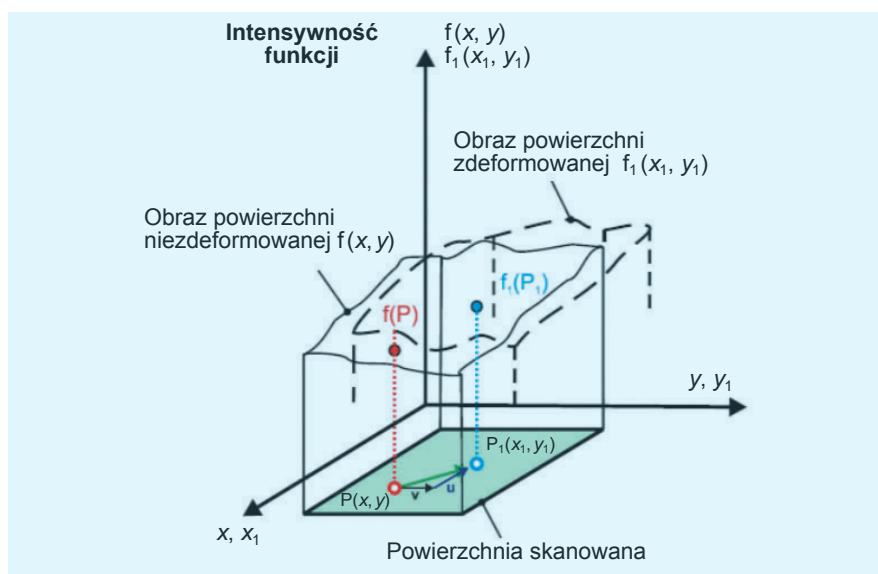
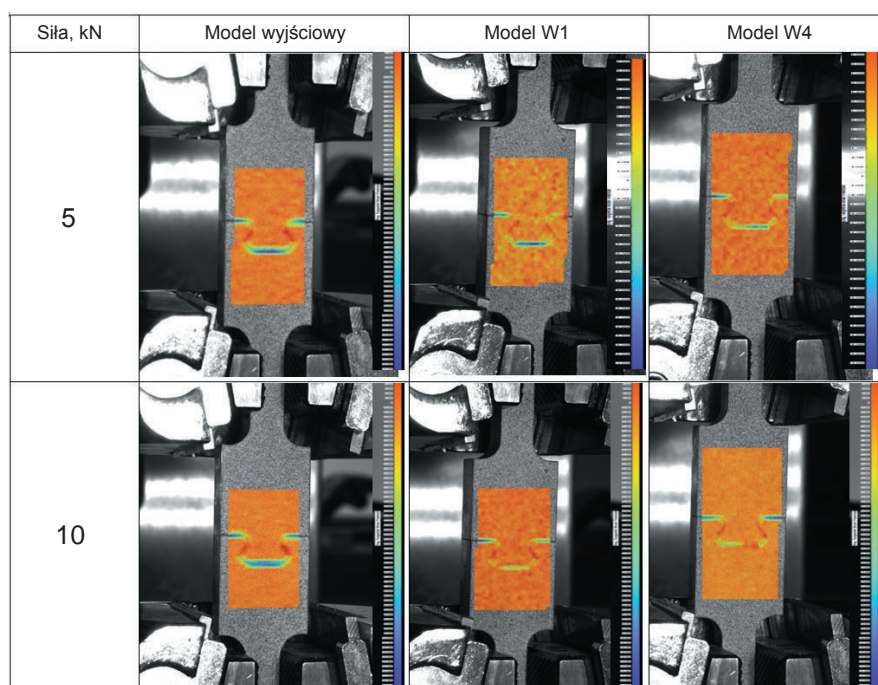
Rys. 3. Rozkład naprężeń zredukowanych, MPa



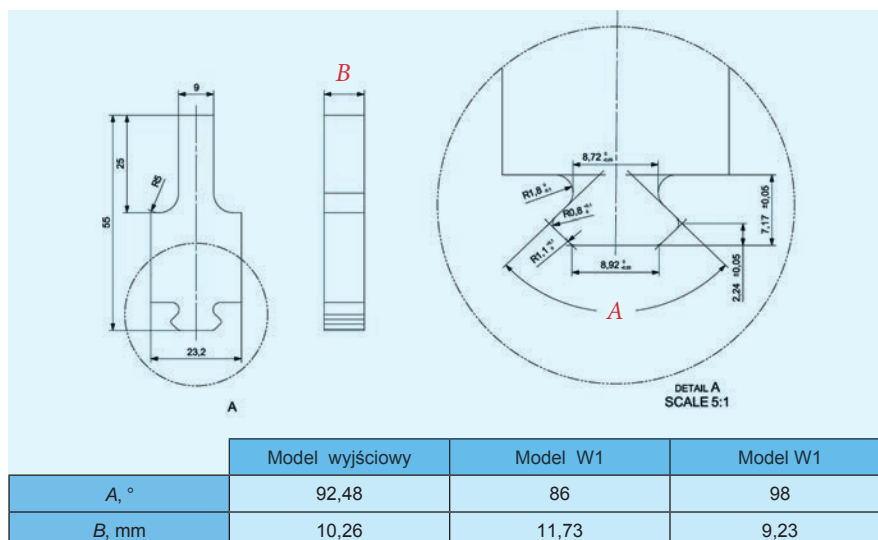
Rys. 4. Rozkład odkształceń, mm



TABLICA II. Pola odkształceń próbek



Rys. 5. Schemat analizy niezdeformowanego i zdeformowanego obrazu powierzchni [1]



Rys. 6. Wymiary badanych próbek

Analizie poddano trzy modele wykonane ze stali niskowęglowej 1.7734.4 o gęstości  $7850 \text{ kg/m}^3$ . Wymiary geometryczne próbek przedstawiono na rys. 6.

Wykonano ok. 60 pomiarów. W tabl. II przedstawiono wyniki obrazujące pola odkształceń przy obciążeniu 5 i 10 kN.

Analizy pokazały, że parametry geometryczne mają dość duży wpływ na wytrzymałość połączenia łopatka–tarcza. W symulacjach numerycznych i doświadczalnych otrzymano porównywalne wartości naprężeń w miejscach ich zwiększonej koncentracji. W analizie numerycznej, przy obciążeniu siłą ok. 5 kN, maksymalne naprężenia na stopce wyniosły ok.  $290 \pm 410 \text{ MPa}$ . W analizie doświadczalnej dla analogicznego obciążenia otrzymanym odkształceniom odpowiadają naprężenia na poziomie  $294 \pm 420 \text{ MPa}$ , w zależności od wariantu geometrycznego.

## Podsumowanie

Przeanalizowano trzy warianty geometryczne połączenia trapezowego łopatka–tarcza obciążonego siłami bezwładności. Przedstawiono rozkłady naprężeń i odkształceń dla każdego przypadku obliczeniowego. Omówiono schemat obliczeń do optymalizacji geometrii w systemie ANSYS, na podstawie którego wytypowano modele numeryczne wykorzystane także w analizie doświadczalnej. Użycie modelu parametrycznego i narzędzi systemu ANSYS pozwoliło na uzyskanie dużej liczby kombinacji parametrów i sprawną analizę wpływu ich zmian na pracę konstrukcji. Doświadczenie pozwoliło zaobserwować rozkłady odkształceń na rzeczywistej powierzchni elementów, a także wskazać miejsca zwiększonej koncentracji.

## LITERATURA

1. Chu T.C., Ranson W.F., Sutton M.A. Peters W.H. „Application of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics”. *Experimental Mechanics*. 25, 3 (1985): s. 232–244.
2. Kachel S. „Metoda wielokryterialnego projektowania bryły samolotu z uwzględnieniem misji”. Rozprawa habilitacyjna. Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna, 2011.
3. Szymczak T., Grzywna P., Kowalewski Z.L. „Nowoczesne metody określania wytrzymałościowych właściwości materiałów konstrukcyjnych”. *Transport Samochodowy*. 1 (2013): s. 79–104.
4. ANSYS 17.1 Workbench Toolbox.
5. www.dantecdynamics.com. ■