

Prof. dr hab. inż. Michał Ciałkowski

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Instytut Energetyki Ciepłej

Politechnika Poznańska

ul. Piotrowo 3

60-965 Poznań

Poznań, 22 maja 2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Olgi Grzejszczak - Pączek pt.: Wytrzymałościowa ocena parametrów konstrukcyjnych wirnika sprężarki osiowej z uwzględnieniem czynników eksploatacyjnych.

Podstawę do opracowania recenzji pracy doktorskiej mgr inż. Olgi Grzejszczak - Pączek stanowi pismo z dnia 24 marca 2023 r. Prof. dra hab. inż. Jerzego Małachowskiego przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna”.

Praca zawarta jest na 174 stronach i jest podzielona na 4 rozdziały poprzedzone: spisem treści, wykazem ważniejszych oznaczeń i skrótów, a w zakończeniu bibliografią liczącą 139 pozycji literaturowych związanych z tematem pracy. Promotorem pracy jest płk Prof. WAT dr hab. inż. Adam Kozakiewicz a promotorem pomocniczym płk dr inż. Robert Rogólski.

1. Uwagi wstępne

Lotnictwo jest dziedziną techniki będącą motorem postępu technicznego, przeto postępy w budowie samolotów wymagają nowoczesnych metod projektowania. Metody te oparte są na przesłankach teoretycznych, metodach doświadczalnych a rozwój komputeryzacji wspomaga rozwój metod numerycznych czego efektem jest wykorzystanie pakietów numerycznej mechaniki jak również mechaniki płynów i termodynamiki. Poznanie i praktyczne opanowanie tych metod wymaga głębokiej wiedzy o równaniach opisujących zjawiska mechaniczne i przepływowe, programach numerycznych wspomagających obliczenia i wiedzy z dziedzin pokrewnych. Szeroki zasób wiedzy mgr inż. Olgi Grzejszczak - Pączek pozwolił na podjęcie tematu zaprezentowanego w Jej pracy doktorskiej.

Jednym z podstawowych elementów silnika odrzutowego dużych mocy jest sprężarka o różnej liczbie wirników (układy dwu- lub trójwirnikowe). W pracy Doktorantka wybrała do analizy wytrzymałościowej stopień wysokiego ciśnienia ze względu na największe obciążenia mechaniczne (siły masowe i aerodynamiczne wynikające z przepływu strumienia masy powietrze o różnym natężeniu). W praktyce spotyka się różne konstrukcje wirników sprężarek osiowych : tarczowe, bębnowe czy bębnowo - tarczowe. Głównym elementem stopnia sprężarki są wieńce łopatkowe. Doktorantka omówiła różne sposoby mocowania łopatek i do analizy wytrzymałościowej Doktorantka wzięła pod uwagę obwodowe mocowanie łopatek w wieńcu tarczy. Jednym z najczęstszych typów mocowania łopatki jest wykonanie stopki łopatki o geometrii trapezowej. Szerokie ujęcie problematyki mocowania (pochylenia powierzchni bocznych *zamka*, kąta definiującego grubość

zamka, zbadanie wpływu tarcia powierzchni zamka) pozwala na wprowadzenie optymalnej konstrukcji pod względem wytrzymałościowym i daje podstawy do diagnostyki pracujących wirników. Szczególne znaczenie ma zachowanie się dynamiczne całego koła wirnikowego. Wyniki badań stanowią podstawę do kształtowania układu integralnego (monolitycznego typu BLISK).

2. Omówienie pracy

Omówienie materiałów stosowanych na elementy wirników sprężarki wysokiego ciśnienia jest istotne z eksploatacyjnego punktu widzenia, gdyż w zakresie pracy sprężarki mamy do czynienia z bardzo dużymi obciążeniami zarówno mechanicznymi jak również termicznymi. Doktorantka zwróciła uwagę na stopy tytanu oraz stopy na osnowie niklu podając ich podstawowe własności spełniające wymagania eksploatacyjne.

Bezpieczna eksploatacja sprężarki i całego układu wirującego wymaga konstrukcji tego układu zapewniającego nieprzekroczenie dopuszczalnych zredukowanych naprężeń. Doktorantka wymienia dwie hipotezy: Hubera – Misesa – Hencky’ego oraz Coulomba – Tresca – Guesta.

Poznanie różnych przyczyn pękania łopatek, wpływu sposobu eksploatacji silników turbinowych na ich trwałość stanowi podstawową wiedzę dla wyznaczenia kierunków badań przedstawionych w dysertacji Doktorantki. Osiowa symetryczność obciążenia tarczy pozwala na analityczne wyznaczenie rozkładu przemieszczeń i naprężeń dla tarcz o prostej geometrii co oddaje pogląd na rząd wielkości naprężeń i przemieszczeń w bardziej skomplikowanych geometriach stopnia sprężarki. W geometriach tych (obszary o dowolnych kształtach) teoria jednowymiarowa nie jest możliwa do stosowania a ponadto uwzględnienie nieliniowości materiału konstrukcji prowadzi do nieliniowych równań, które można tylko rozwiązać w sposób przybliżony z pomocą metod numerycznych. Z pomocą tutaj przychodzą podstawowe metody jak metoda elementu skończonego (w ciele stałym) i metoda objętości skończonych w obszarze płynu. Trzecią metodą jest metoda elementu brzegowego prowadząca do pełnych układów równań (w przeciwieństwie do metody elementu skończonego charakteryzującą się pasmowymi układami równań). Dla obydwu tych metod istnieją programy komercyjne pozwalające na zbadanie problemu wytrzymałościowo – przepływowego w sprężarce.

Przedstawienie przeglądu najważniejszych (krajowych i zagranicznych) prac ukazujących skuteczność metody elementu skończonego do rozwiązywania problemów wytrzymałościowych (statycznych i dynamicznych również z obciążeniami termicznymi) układów łopatkowych pozwoliło na wskazanie krytycznych obszarów pracy układów wieńcowych tarcz wirnikowych. Eksploatacja silników turbinowych o różnej konstrukcji wyznacza klasę konstrukcji połączenia tarczy z palisadą profilów, które stanowią bazę odniesienia dla konstrukcji integralnej typu BLISK. **W istocie chodzi o zaprojektowanie konstrukcji integralnej o podobnym zachowaniu dynamicznym (częstości drgań własnych), mniejszej masie i mniejszych dopuszczalnych naprężeniach zredukowanych.** Takie ujęcie problemu stanowi główny element pracy. Równania teorii sprężystości opisujące zachowanie się konstrukcji koła w stanach statycznych czy dynamicznych są w ogólności

nieliniowymi równaniami różniczkowymi cząstkowymi wysokiego rzędu w obszarze nieregularnym. W ogólności nie można rozwiązać tych równań metodami analitycznymi. Rozwiązania tych równań dokonuje się z zastosowaniem metody elementu skończonego opartej na zasadach wariacyjnych. Implementacja tych metod zawarta w systemie komputerowym ANSYS i z oprogramowaniem CAD tworzy wystarczające narzędzie do realizacji zamierzeń Doktorantki dotyczących analizy naprężeń i przemieszczeń w klasycznych konstrukcjach koła wirnikowego z łopatkami i koła konstrukcji integralnej (typu BLISK).

Ta wiedza pozwoliła Doktorantce na postawienie tezy pracy w następującej formie : ***Bazując na modelach odwzorowujących połączenie łopatka – tarcza można, poprzez ocenę parametrów geometrycznych zidentyfikować te cechy konstrukcji, które krytycznie wpływają na obciążenia podzespołu i mogą stanowić bazę do procesu optymalizacji.***

Trapezowy zamek łopatki mocowanej obwodowo stanowi główny obszar badań w którym charakterystycznymi wielkościami geometrycznymi są: kąt szerokości P1 będący kątem pochylenia powierzchni bocznych zamka oraz kąt grubości P2 związany z grubością zamka. Te dwie wielkości (parametry P1 i P2) mają istotny wpływ na naprężenia zredukowane. Doktorantka analizuje wpływ zmienności tych parametrów dla dwóch podstawowych wartości prędkości obrotowych 65% i 100% wirnika wysokiego ciśnienia t. j. $N1=9869$ [obr/min], $N2=15183$ [obr/min] Z analizy wyników obliczeń dla kąta $P1=92,475^{\circ}$ w funkcji parametru P2 i dwóch wspomnianych prędkości obrotowych (biegu jałowego i prędkości maksymalnej), rys. 3.6 i 3.7 wynika intensywny wzrost naprężeń zredukowanych powyżej $1,25^{\circ}$. *Byłoby bardziej czytelne zestawienie wyników z rys. 3.6 i 3.7 na jednym rysunku i zaznaczenie naprężeń dopuszczalnych linią poziomą.* Podobna uwaga tyczy się następnych wykresów.

W konstrukcji integralnej analizie podlegały składowe grubości tarczy wirnikowej, które oznaczono jako V14 i V12 (rys. 3.4). Dla maksymalnych wartości parametrów V14 i V12 wyznaczono wpływ zmiany parametru V12 (przy stałej wartości parametru V14) na naprężenia zredukowane, odkształcenia względne i przemieszczenia dla prędkości biegu jałowego i maksymalnej prędkości. Podobnie, dla przejrzystości, jak powyżej rysunki 3.14 i 3.15 oraz 3.16 i 3.17, 3.18 i 3.19 jak również 3.20 i 3.21 (po uprzednim rozdzieleniu przemieszczeń od odkształcenia względnego) można połączyć parami. Podobnej analizy dokonano dla stałej wartości parametru V12 i zmiennej wartości parametru V14. Otrzymane wyniki stanowią podstawę do wykonania analizy przepływowo - strukturalnej co pozwala na ujęcie wzajemnego oddziaływania struktury tarczy na przepływ płynu (powietrza). Duża liczba zobrazonych przeliczeń pozwoliła na porównanie przebiegów naprężeń zredukowanych, przemieszczeń i odkształceń względnych i sił aerodynamicznych dla obydwu konstrukcji (klasycznej z zamkiem i integralnej typu BLISK).

O ile można byłoby rozważać równoczesne badanie rozkładu (zmian) parametrów P1 i P2 czy V12 i V14 na wspomniane powyżej wielkości, **to dołączenie wpływu tarcia w**

przypadku połączenia zamkowego pióra łopatki z tarczą istotnie komplikowałoby proces obliczeniowy. Bardziej przydatne jest rozważenie wpływu tarcia na naprężenia zredukowane, przemieszczenia i odkształcenia względne w funkcji prędkości obrotowej wału sprężarki. Przedstawione 4 wykresy na rys. 3.107 byłoby chyba lepiej przedstawić jako jeden rysunek co pozwoliłoby na większą czytelność wpływu współczynnika tarcia dla różnych wartości prędkości obrotowej. Podobna uwaga dotyczy wykresów na rys. 3.108 i 3.109. Jako, że w rzeczywistych warunkach zawsze występuje tarcie, przeto zbadanie jego wpływu na naprężenia zredukowane, przemieszczenia czy odkształcenia względne jest wartościowe tym bardziej, że wielkość współczynnika tarcia zależy też od dokładności wykonania powierzchni zamka. W konstrukcji integralnej koła wirnikowego ten problem nie występuje.

Konstrukcja koła wirnikowego jest poddana nie tylko siłom pochodzącym od wirowania lecz ze względu na swoje przeznaczenie poddana jest siłom aerodynamicznym. To ważne sprzężenie wymaga analizy wrażliwości (czułości) na wcześniej wspomniane parametry P1 i P2 oraz V12 i V14. Dostępne systemy komputerowe pozwalają na taką analizę, której wyniki przedstawiono w punkcie 4.1. Wyniki te obejmują różne wielkości ciśnienia na wlocie. Badania wrażliwości Doktorantka przedstawiła dla koła klasycznego i integralnego.

3. Podsumowanie

Przeprowadzone badania Doktorantki pozwoliły na :

- ✦ opracowanie metodyki badania tarczy wirnikowej z łopatkami trapezowymi montowanymi obwodowo poprzez wyznaczenie istotnych parametrów konstrukcji mających największy wpływ na wytrzymałość konstrukcji z uwzględnieniem obciążenia aerodynamicznego,
- wykorzystanie metod inżynierii odwrotnej,
- uwzględnienie tarcia na powierzchniach mocowania pióra łopatki,
- optymalizację układu typu BLISK w zakresie zmniejszenia masy z uwzględnieniem zachowania dynamicznego jak w kole wzorcowym z zamkiem.

Wpływ zmiany parametrów P1 i P2 można również traktować jako ujęcie błędów wykonania podobnie współczynnik tarcia na który wpływają tolerancje wykonania. Szerokie badania Doktorantki potwierdziły potrzebę istnienia dobrze zbadanego klasycznej tarczy wirnikowej, aby dokonać optymalizacji konstrukcji typu BLISK

4. Uwagi

W trakcie czytania pracy zauważyłem drobne nieścisłości jak :

- wzór (1.25) , powinno być $\rho\omega r$ a nie $\rho\omega r^2$,
- poniżej wzoru (1.28), powinno być σ_θ a nie σ_u ,
- w iloczynach $[u][A][v]$, które są liczbą poprawny zapis, to $\{u\}^T[A]\{v\}$, dotyczy to zapisów w zależnościach (1.44)-(1.48) , (1.50) i (1.55). Te drobne nieścisłości omówiłem z Doktorantką.

5. Podsumowanie

Doktorantka dokonała szczegółowej analizy literatury przedmiotu i na podstawie własnych doświadczeń sformułowała tezę swojej pracy, której było

***opracowanie metodyki wspomagającej dobór optymalnych parametrów geometrycznych
i wytrzymałościowych wybranych elementów konstrukcji wirujących.***

Należy tutaj dodać, że uwzględnienie przypadku szczególnego połączenia łopatka-tarcza stanowi podstawę do określenia optymalnych parametrów zachowania dynamicznego konstrukcji integralnych (BLISK). Słuszność postawionej tezy Doktorantka potwierdziła przeprowadzonymi badaniami.

Przeprowadzone badania Doktorantki mgr inż. Olgi Grzejszczak - Pączek jednoznacznie świadczą o Jej umiejętnościach do prowadzenia badań naukowych z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi numerycznej mechaniki i numerycznej mechaniki płynów w zastosowaniu do projektowania kół wirnikowych z łopatkami montowanymi obwodowo jak również nowoczesnych kół o konstrukcji integralnej .

W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgr inż. Olgi Grzejszczak - Pączek spełnia wymogi obowiązującej Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” WAT o dopuszczenie mgr inż. Olgi Grzejszczak - Pączek do publicznej obrony recenzowanej pracy. **Jednocześnie uważam osiągnięcia zaprezentowane w rozprawie doktorskiej za niezwykle przydatne do zastosowania w procesie projektowania tarcz wirnikowych sprężarek osiowych.**

Michał Ciechanowski