

Rzeszów, 7.12.2020

Prof. dr hab. Anna Kucaba-Piętal,  
Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza  
e-mail: [anpietal@prz.edu.pl](mailto:anpietal@prz.edu.pl),  
tel. 178651351, kom. 503026198

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**mgr. inż. Justyny Anny FLIS**

### **„Optymalne projektowanie konstrukcji w przypadku utraty stateczności dynamicznej – zjawisko flutteru dla nadkrytycznych prędkości płynu”**

Recenzja została opracowana na podstawie pisma L.dz. M.00-520-102/2020 z dnia 1.10.2020, skierowanego do mnie przez Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej, Prof. dr. hab. inż. Jerzego Śładka w związku z przewodem doktorskim **mgr. inż. Justyny Anny FLIS**. Do pisma dołączony został egzemplarz rozprawy doktorskiej.

#### **1. Przedmiot recenzji**

Rozprawa doktorska **mgr. inż. Justyny Anny FLIS** zatytułowana *Optymalne projektowanie konstrukcji w przypadku utraty stateczności dynamicznej – zjawisko flutteru dla nadkrytycznych prędkości płynu* została wykonana pod opieką Pana Prof. dr hab. inż. Aleksandra Muca. Praca została napisana w języku polskim, liczy 118 stron. Treść podzielono na siedem rozdziałów, do których dołączono trzy załączniki oraz spis cytowanej literatury obejmujący 258 pozycji. Wstęp poprzedza spis oznaczeń, co ułatwia czytanie. W pracy zamieszczono wymagane ustawowo streszczenia w języku polskim i angielskim.

## 2. Tematyka, cel, zakres pracy

Negatywne zjawiska aeroelastyczne były w historii rozwoju lotnictwa przyczyną licznych wypadków. Zjawiska aeroelastyczności dynamicznej mają zwykle charakter drgań. Badanie tych zjawisk sprowadza się albo do określenia warunków stateczności drgań, albo do wyznaczenia reakcji dynamicznej obiektu na zewnętrzne zaburzenie, z uwzględnieniem sił aerodynamicznych. Wskutek istnienia efektów nieliniowych konstrukcji narastanie drgań może jednak zostać zatrzymane na pewnej amplitudzie, co jest określane cyklem granicznym (*limit-cycle oscillation, LCO*). Amplituda cyklu granicznego zwykle narasta ze wzrostem prędkości strugi. W takim przypadku można wytłumić drgania poprzez zmniejszenie prędkości. W początkach lotnictwa, gdy brak było doświadczeń i wiedzy w tej dziedzinie, często zdarzały się tajemnicze katastrofy spowodowane niespodziewanym zniszczeniem skrzydeł, usterzeń bądź odpadnięciem powierzchni sterowych. Z tego względu dość wcześnie zaczęto badać te zjawiska i stwierdzono, że niekiedy mają one formę aperiodyczną, najczęściej jednak są to drgania samowzbudne. Pewną klasę drgań samowzbudnych nazwano flatterem (z niem. *Flatter*, ang. *flutter* - trzepotanie). W 1916 r po raz pierwszy zbadano flatter występujący na dwusilnikowym, dwupłatowym bombowcu *Handley Page O/400*.

Przepływy naddźwiękowe,  $Ma > 1$ , charakteryzują się zjawiskami, które nie występują w przepływach z mniejszą prędkością. Powstają fale uderzeniowe lub/i fale rozszerzeniowe które powodują skokowe zmiany wartości wszystkich wielkości przepływowych oraz interakcja z warstwą przyścienną oraz powstawanie dodatkowego oporu falowego opływanej powierzchni. Położenia fal zależą od prędkości i kąta napływu. Przy opływie trójwymiarowym sytuacja jeszcze bardziej się komplikuje, gdyż dochodzi - jak w przypadku opływu płyty - opływ naroży, który będzie powodować niestabilność i oscylacje. Z wymienionych przyczyn, mimo intensywnych badań i analiz pierwszy samolot naddźwiękowy powstał dopiero w połowie ubiegłego wieku.

Mimo, że od rozpoczęcia badań nad flatterem dzieli nas wiek, nadal intensywnie prowadzone są analizy i badania nad tym zjawiskiem, ze względu na bezpieczeństwo konstrukcji, rozwój metod badawczych oraz nowych materiałów i technologii stosowanych w konstrukcjach. Powstają nowe metody badawcze oraz rozwijane są istniejące.

W ten obszar wpisuje się tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej w której podjęto problematykę optymalnego projektowania wielowarstwowych struktur kompozytowych podczas ich opływu z prędkością naddźwiękową w aspekcie wystąpienia flatteru. Tematyka pracy jest istotna i aktualna.

Analizy prowadzono dla płyt i paneli wykonanych z laminowanych materiałów kompozytowych oraz porowatych funkcjonalnych materiałów gradientowych. Rozwiązania zadań optymalizacji otrzymano analitycznie stosując pakiet obliczeń symbolicznych z systemu obliczeń symbolicznych i numerycznych; Mathematica . oraz numerycznie, wykorzystując oprogramowanie NISA 2 .

### 3. Ocena merytoryczna rozprawy

Rozdział 1 zawiera wprowadzenie do przedmiotu badań. Omówiono w nim w bardzo skrótowy sposób podstawy stateczności układów sprężystych w szczególności utratę stateczności dynamicznej i flutter w inżynierii lotniczej. Następnie sformułowano cel oraz zakres pracy przedstawiono wartości dalszych części pracy w kolejności ich występowania. Rozdział kończy przegląd literatury przedmiotu.

*Określenie „ciśnienie aerodynamiczne” użyte po raz pierwszy w tym rozdziale a następnie w całej pracy w przepływach naddźwiękowych nie jest stosowane. Ze względu na specyfikę przepływów naddźwiękowych wyróżniamy: ciśnienie statyczne, dynamiczne, spiętrzenia, krytyczne i są one ściśle zdefiniowane. Autorka powinna zatem sprecyzować jakie z ciśnien tak zostało nazwane.*

Rozdział 2 stanowi opis podstaw mechaniki struktur z materiałów rozpatrywanych w pracy: laminowanych materiałów kompozytowych oraz porowatych funkcjonalnych materiałów gradientowych.

*Rys 2.9 na którym zaprezentowano geometrie jest niejasny. Jedna os układu współrzędnych jest wygięta ( jaki to układ? ) Reprezentacja prędkości wektorem równoległym do paneli nie jest właściwa, gdyż nie odzwierciedla fizyki przepływów naddźwiękowych. W tym obszarze wystąpią fale uderzeniowe w zależności od kąta theta, ( vide wzór.2.26), którego na rysunku nie zaznaczono. Uwaga ta dotyczy również kolejnych rysunków: 3.2 oraz 5.1.*

W rozdziale 3 przedstawiono metody rozwiązywania zagadnień utraty stateczności dynamicznej (analityczne i numeryczne) ; Raileigha-Ritza, Bobunowa-Galerkina, analityczną oraz metody elementów skończonych ( MES). *Opis rysunku 3.1 jest w języku angielskim, nie ma na nim zaznaczonych ani jednostek ani wartości, brak odwołania skąd rysunek zaczerpnięto.*

*W części 3.7 zatytułowanej „metody MES” opisano metody: panelowe oraz siatki wirowej, które do metod MES nie należą i opierają się na diametralnie innych zasadach. MES służy do rozwiązywania równań różniczkowych niezależnie od uproszczeń fizycznych, natomiast metody panelowe oraz wirowa są metodami przybliżonymi i stosuje się je jedynie do opływów potencjalnych, nielepkich pod małym kątem natarcia, cienkich płatów. Autorka używa w rozdziale określeń niezgodnych z terminologią używanymi w polskich podręcznikach/ monografiach z zakresu aerodynamiki.*

W rozdziale 4. sformułowano problem optymalizacji, dokonano w nim na wstępie przeglądu podstawowych trendów i dominujących podejść w optymalnym projektowaniu struktur. Szczególną uwagę skupiono na sformułowaniu funkcji celu oraz definicji zmiennych decyzyjnych; fizycznych (materiałowych) oraz geometrycznych ( np. zmienna grubość, warunki brzegowe) w aspekcie optymalizacji struktur/ materiałów kompozytowych rozumianych nie tylko jako laminaty wielowarstwowe, ale także jako struktury warstwowe, nanokompozyty, materiały funkcjonalne gradientowe oraz struktury kompozytowe. Rozdział kończy skrótowy opis algorytmów optymalizacji w kontekście zastosowań

do problemów aeroelastycznych. *Przedstawiono bardzo ciekawe podejście do zagadnienia optymalizacji. Nie podano jaki zestaw rozmyty zastosowano, jako przykład zastosowania schematu na rys 4.6.*

Rozdział 5. dotyczy optymalnego projektowania płyt kompozytowych w opływach naddźwiękowych. Na początku wymieniono założenia przyjęte do prowadzonych analiz. Następnie omówiono wyznaczanie częstotliwości drgań swobodnych dla dwóch rodzajów płyt: (i) wielowarstwowych laminowanych (ii) wykonanych z porowatych funkcjonalnych materiałów gradientowych (FMG). Przedstawiono rozwiązania otrzymane w kontekście celu pracy dla różnych warunków brzegowych oraz orientacji warstw w oparciu o analizę częstotliwości. Dalej podjęto zagadnienie maksymalizacji wartości ciśnienia. Otrzymano metoda analityczna rozwiązanie równania charakterystycznego i na tej podstawie badano wpływ orientacji, obciążeń termomechanicznych oraz właściwości mechanicznych płyt FMG. Porównanie otrzymanych wyników obliczeń z dostępnymi w literaturze pokazało zgodność. Badano również wpływ obciążeń termomechanicznych.

Wyniki analiz dla: różnych zmiennych decyzyjnych: orientacji włókien, różnych warunków brzegowych płyty prostokątnej oraz jej różnych wydłużeń względnych zaprezentowano na 24. rysunkach, w większości o angielskich opisach, gdzie wielkości fizyczne reprezentowane na osiach podano bez jednostek zaś na rys 5.9-5.14, na osiach nie zaznaczono zmiennych. Otrzymane rezultaty pokazały wpływ zmiennych decyzyjnych przyjętych w pracy zarówno na max wartość częstotliwości jak i max. ciśnienie. Szczegółowo omówiono wyniki prezentowane na wykresach co wzbogaca wiedze z zakresu optymalizacji konstrukcji analizowanych struktur. Rezultaty otrzymano poprawnie jednakże przy dużym uproszczeniu modelowym. *Przyjęcie w założeniach modelowych teorii piston, która została wyprawadzona dla przepływów nielepkich powoduje eliminacje sil tarcia oraz oddziaływań fal uderzeniowych z warstwa przyścienną. Brakuje oszacowania błędu przyjętego modelu opływu w odniesieniu do przepływu rzeczywistego, który w tak prostym przypadku łatwo można wyznaczyć. Zabrakło mi w tej części pracy interpretacji otrzymanych wyników na gruncie fizyki zjawisk występujących przy naddźwiękowym opływie płytki - skoków ciśnienia prędkości i temperatury spowodowanych falą uderzeniowych na jej powierzchni górnej i dolnej oraz przy opływie naroży.*

*Na rysunku 5.1 - geometria problemu - nie zaznaczono kierunku prędkości oraz kata natarcia. Jak interpretować „maksymalizacje ciśnienia” oraz krzywe własności własnych przy tak dużych uproszczeniach wynikających z przyjętych założeń, nie mając oszacowanego błędu modelowego?*

*Nie wyjaśniono dla jakich wartości wielkości geometrycznych płyt oraz fizycznych przepływu otrzymano wyniki, jakie wartości ciśnienia na górnej oraz dolnej powierzchni płyty/panelu zostały przyjęte. Autorka używa określenia ciśnienie krytyczne. Pojęcie to (ciśnienie krytyczne) w przepływach ściśliwych / naddźwiękowych w terminologii przyjętej w aerodynamice jest ściśle zdefiniowane, dla powietrza jego wartość wynosi 0695 po, gdzie po to ciśnienie spiętrzenia i nie może być używane do określania innych wielkości.*

Rozdział 6. dotyczy optymalnego projektowania laminowanych paneli cylindrycznych w opływie naddźwiękowym. struktura opisu badań jest analogiczna jak w rozdziale poprzednim. Zawiera opis założenia przyjętych do analiz, opis i rozwiązanie zagadnienia częstotliwości drgań swobodnych oraz maksymalizacji ciśnienia dla paneli cylindrycznych. Rozwiązania otrzymana metoda numeryczna i analityczna. Następnie analizowano efekt wpływu zmiennych decyzyjnych na uzyskane wyniki. Rozdział kończy porównanie wyników rozwiązań uzyskanych w pracy z dostępnymi w literaturze. Nie podano czy są to wyniki doświadczalne czy również obliczeniowe. Stwierdzam, że wszystkie obliczenia i analizy zostały wykonane poprawnie, jednakże przy dużym uproszczeniu modelu opływu naddźwiękowego.

Rozdział 7, stanowią wnioski końcowe oraz kierunki dalszych badań. Na podstawie otrzymanych badań wnioski wysnute są prawidłowo. W opisie kierunków dalszych badań *nie wskazano weryfikacji eksperymentalnej wyników, oraz estymacji błędu modelowego, która w mojej opinii jest znacząca dla wykorzystania utylitarne dalszych optymalizacyjnych analiz modelowych.*

#### 4. Uwagi

- 1) W treści pracy nie wyjaśniono dlaczego rozpatrywano przepływy naddźwiękowe dla  $Ma > 1,5$  (vide cel pracy) zwłaszcza, że przepływ naddźwiękowy zamodelowano z pominięciem istotnych zjawisk fizycznych.
- 2) W jaki sposób uwzględniano w obliczeniach zmienność ciśnienia na płycie opływanej strumieniem naddźwiękowym?
- 3) Wyniki otrzymane w pracy opierają się na wykonanych przez Autorkę na obliczeniach numerycznych oraz analitycznych. Brakuje sformułowania problemu przyjętego do obliczeń, poprawnych rysunków oraz informacji:
  - 1) równań, z jakich korzystano uzyskując wyniki numeryczne,
  - 2) przyjętych warunków początkowych i brzegowych do rozwiązania tych równań
  - 3) wartości stałych materiałowych płynu ( lepkość, ściśliwość, itp) ciała stałego (płyt, paneli itp.) oraz wymiarów geometrycznych płyt ( dla paneli w rozdz. 6. Zostały podane) oraz parametrów przepływowych : prędkości, kąta napływu na płytkę zostały użyte w obliczeniach
  - 4) wartości prędkości naddźwiękowych ( $Ma$ ) przy których wykonano obliczenia,
  - 5) określenia efektu wpływu wartości  $Ma$  na wyniki.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska pod względem edytorskim i językowym napisana jest niezbyt starannie. Użyta terminologia jest niezgodna ze stosowaną w aerodynamice. Większość rysunków jest z oznaczeniami angielskimi, nie podano przy tych rysunkach skąd zostały zaczerpnięte.

## 5. Ocena rozprawy

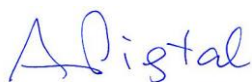
Zawartość rozprawy ma charakter analityczno – teoretycznej pracy naukowo-badawczej. Wykorzystano współczesne narzędzia badawcze do obiektu badań - najnowszych materiałów. Otrzymane rezultaty są poprawne i ciekawe i dowodzą celowości i efektywności zastosowania metod optymalizacji w projektowaniu struktur narażonych na utratę stateczności dynamicznej, co rozszerza wiedzę z tego zakresu.

Założony przez Doktorantkę trudny cel pracy został zrealizowany przy znacznych uproszczeniach modelowych opływu naddźwiękowego struktur, zaś sformułowana teza pracy - potwierdzona. Aby określić czy wyniki mogą mieć zastosowanie użytkowe w przepływach naddźwiękowych, należałoby przednio zweryfikować je doświadczalnie. **Ocena pracy jest pozytywna.**

## 6. Wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z przedstawioną rozprawą doktorską mgr. inż. Justyny Anny FLIS zatytułowaną „*Optymalne projektowanie konstrukcji w przypadku utraty stateczności dynamicznej – zjawisko flatteru dla nadkrytycznych prędkości płynu*” stwierdzam, że rozprawa ta stanowi rozwiązanie ważnego problemu naukowego w dziedzinie nauk inżyniersko - technicznych **w dyscyplinie inżynieria mechaniczna** oraz spełnia wymagania określone obowiązującą **Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.**

**Wnoszę zatem o przyjęcie przez Radę Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej rozprawy doktorskiej i dopuszczenie Pani mgr. inż. Justyny Anny FLIS do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**



Prof. dr hab. Anna Kucaba-Pietal

”