

Warszawa, 09.11.2020 r.

Prof. dr inż. Mariusz Pyrz (hab. Francja)
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych
Politechnika Warszawska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Justyny Anny Flis

***"Optymalne projektowanie konstrukcji w przypadku utraty stateczności dynamicznej
- zjawisko flatteru dla nadkrytycznych prędkości płynu"***

Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Aleksander Muc
Recenzję opracowano na prośbę Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej
zgodnie z uchwałą Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego PK z dnia 23.09.2020 r.

1. Tematyka rozprawy

Praca doktorska mgr. inż. Justyny Anny Flis dotyczy zagadnień związanych z optymalizacją konstrukcji narażonych na utratę stateczności dynamicznej. Analizowane są w niej kompozytowe, warstwowe płyty i małowyniosłe powłoki walcowe a także płyty wykonane z tworzyw gradientowych. Rozpatrywany był przypadek obiektu poruszającego się w otaczającym je płynie i sytuacja, w której osiągnięte prędkości nadkrytyczne i działające ciśnienie aerodynamiczne powodują utratę stateczności przez flatter. W sformułowanym przez Doktorantkę problemie optymalizacji poszukiwany jest sposób ułożenia włókien w warstwach laminatu, prowadzący do maksymalnej wartości krytycznej ciśnienia aerodynamicznego. Rozważania dotyczyły ponadto płyt z porowatych materiałów gradientowych i analizy wpływu rozkładu porowatości na charakterystyki flatteru. Przedstawione rozwiązania otrzymano analitycznie (z wykorzystaniem pakietu Mathematica) i numerycznie (za pomocą programu MES - NISA II). Zamieszczone przykłady numeryczne obejmują przypadki różnych geometrii badanych struktur, warunków brzegowych, parametrów laminatu i oraz kilku rozkładów właściwości tworzyw gradientowych.

Jako cel pracy Doktorantka postawiła "poszukiwanie maksimum ciśnienia aerodynamicznego" dla laminowanych płyt i paneli" a także "badanie optymalnego rozkładu porów" w przypadku płyt z funkcjonalnych materiałów gradientowych. Podjęta tematyka jest aktualna i ważna. Wiąże się z perspektywami stosowania zaawansowanych materiałów w wielu dziedzinach lotnictwa i aeronautyki. Umożliwia ponadto pełniejsze zrozumienie zjawisk zachodzących w sytuacji obciążeń krytycznych. Do istotnych zagadnień z tego zakresu można zaliczyć właśnie dynamiczną utratę stateczności konstrukcji i dążenie do optymalnego projektowania struktur narażonych na takie niebezpieczeństwo. Zamieszczony przegląd literatury (mimo iż potraktowany dość skrótowo we wstępie, ale uzupełniany i rozbudowany w dalszych rozdziałach) ilustruje wagę tematu i umiejscawia podjętą tematykę na tle aktualnego stanu wiedzy.

Temat rozprawy jest aktualny i ważny, jej cel sformułowany prawidłowo, przedstawione wyniki wnoszą nowe elementy do rozpatrywanego zagadnienia.



2. Treść i zakres pracy doktorskiej

Praca została napisana w języku polskim i zajmuje łącznie 120 stron. Składa się ze spisu treści, wykazu najważniejszych oznaczeń, siedmiu rozdziałów, trzech załączników, bibliografii oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

We wstępie do pracy Autorka przedstawiła ogólnie zagadnienie stateczności układów sprężystych na przykładzie pręta obciążonego ściskającą siłą osiową. Rozważania rozszerzyła o przypadek siły śledzącej a także opis utraty stateczności przez dywergencję i flutter dla obiektów poddanych obciążeniom pochodzącym od ciśnienia podczas opływu obiektu przez otaczający płyn. Oprócz interpretacji graficznej granic niestabilności dynamicznej podała klasyfikację modeli stosowanych w literaturze do analizy flatteru w funkcji prędkości przepływu. Przedstawiła cel i zakres pracy oraz krótki przegląd artykułów dotyczących zagadnień optymalizacji w których uwzględniano stateczność dynamiczną.

Rozdział drugi zawiera wprowadzenie teoretyczne do mechaniki laminowanych materiałów kompozytowych i porowatych funkcjonalnych tworzyw gradientowych. Podano w nim związki fizyczne i sposób wyprowadzenia równań równowagi dynamicznej dla laminatów. Przedstawiono ponadto zmienność właściwości mechanicznych analizowanych materiałów o strukturze gradientowej w zależności od wybranej funkcji rozkładu porowatości.

Rozdział trzeci poświęcono metodom rozwiązywania zagadnienia utraty stateczności dynamicznej. Podano szczegóły wyprowadzanych równań równowagi i sposób aproksymacji rozwiązania dla analizowanych w rozprawie płyt i powłok warstwowych. Przedstawiono ogólnie sformułowania zagadnienia wartości i wektorów własnych dla metody Rayleigha-Ritza, Bubnova-Galerkina oraz dokładniej podejście analityczne, wykorzystane w pracy, opracowane dla wielowarstwowych płyt i powłok cylindrycznych. Szczegóły operatorów różniczkowych i elementy otrzymanych równań zamieszczone zostały w załącznikach. Opisano również wykorzystanie MES i metody stosowane do modelowania zjawiska flatteru.

W rozdziale czwartym sformułowany został problem optymalizacji. Na początku omówiono postać ogólną zagadnienia, którą następnie uściślono wybierając jako kryterium maksymalizację ciśnienia aerodynamicznego. Jako zmienne decyzyjne w przypadku laminowanych struktur kompozytowych wybrano orientację włókien zbrojenia. Zmienne te opisywane są przez wartości ciągłe (dla kompozytów o symetrycznym kątowym układzie warstw) a także wartości dyskretne, wykorzystując oryginalny, nowy sposób reprezentacji poszukiwanych niewiadomych (możliwy dla laminatów o określonym zbrojeniu symetrycznym względem powierzchni środkowej). Przypadek optymalizacji materiałów gradientowych został ograniczony do przeglądu literatury. Zamieszczono również skrótowe omówienie algorytmów optymalizacji stosowanych w zagadnieniach aero-termo-sprężystych.

Rozdział piąty ma ogólny tytuł "Projektowanie płyt kompozytowych" ale w rzeczywistości dotyczy analizy wpływu wybranych zmiennych optymalizacji na wartości ciśnienia aerodynamicznego związanego z modelowanym zjawiskiem utraty stateczności dynamicznej. Doktorantka prezentuje na wstępie zmienność częstotliwości drgań swobodnych różnie zamocowanych płyt o zbrojeniu kątowym w zależności od kąta ułożenia warstw a także przykład wpływu typu porowatości na wspomniany parametr. Następnie dla różnych warunków zamocowania płyty pokazane są krzywe wartości własnych rozwiązywanego zagadnienia stateczności, obliczone analitycznie. Wykresy te umożliwiają lokalizację ciśnień

krytycznych powodujących flutter i sporządzenie izolinii wartości własnych i ciśnień krytycznych. Zbadano wpływ rozkładu właściwości mechanicznych płyt o strukturze porowatej i sposobu ich zamocowania na charakterystyki flutteru i przedstawiono graficznie trajektorie ciśnień krytycznych. Wyniki obliczeń analitycznych zweryfikowano porównując je z rezultatami opublikowanymi przez innych autorów. Oszacowano ponadto wpływ temperatury na ciśnienia krytyczne płyt laminowanych.

W rozdziale szóstym autorka przedstawiła wyniki uzyskane dla małowyniosłych laminowanych powłok cylindrycznych poddanych działaniu naddźwiękowego ciśnienia aerodynamicznego. Porównane zostały częstotliwości drgań własnych płyt i analizowanych powłok, pokazano ich wykresy konturowe oraz zbadano wpływ warunków brzegowych. Następnie podano szczegóły rozwiązywania zagadnienia stateczności dynamicznej za pomocą opracowanej metody analitycznej oraz programu MES. Porównano zmienność ciśnienia krytycznego płyt i małowyniosłych paneli cylindrycznych dla różnych orientacji włókien laminatu, wymiarów, sposobu zamocowania struktury i ciśnienia aerodynamicznego. Stosując wprowadzone wcześniej "płaszczyzny decyzyjne" przedstawiono graficznie przebieg trajektorii ciśnienia krytycznego i dla wybranego panelu wskazano na rysunku punkt odpowiadający maksimum. Prawidłowość wyników obliczeniowych zweryfikowana została przez porównanie z rezultatami opublikowanymi w innej pracy.

Rozdział siódmy przedstawia wnioski sformułowane na podstawie uzyskanych wyników obliczeniowych. Wskazuje także możliwości kontynuacji podjętego zagadnienia i kierunki dalszych prac.

W trzech załącznikach zamieszczone zostały wzory i sformułowania matematyczne dotyczące równań metody analitycznej zastosowanej do rozwiązania rozważanego problemu.


Obszerny spis literatury obejmuje łącznie 258 pozycji, w tym pięć współautorstwa Doktorantki z promotorem, opublikowane w czasopismach z listy JCR.

Streszczenia (w języku i angielskim) przedstawiają skrótowo zawartość pracy. Oprócz opisu podjętej tematyki, wykorzystanych metod i ogólnej charakterystyki analizowanych konstrukcji nie ma w nich niestety krótkich wniosków ani podsumowania osiągniętych wyników.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Podjęta w rozprawie tematyka jest ważna i aktualna - zwłaszcza w kontekście badania właściwości elementów z zaawansowanych materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym i aeronautyce. Doktorantka sformułowała nietrywialny problem naukowy, rozwiązała postawione zadanie metodami analitycznymi i numerycznymi, przedstawiła liczne przykłady obliczeniowe a na podstawie uzyskanych wyników sformułowała szereg nowatorskich wniosków. Wnosi to istotny wkład w tematykę optymalizacji rozpatrywanych konstrukcji wykonanych z materiałów niejednorodnych. Rezultaty pracy doktorskiej oceniam bardzo wysoko. Nie dostrzegłem w rozprawie poważniejszych błędów merytorycznych.

Doktorantka jest współautorką sześciu aktualnych, wysokopunktowanych publikacji z listy JCR. Świadczą one o uznaniu środowiska naukowego i wysokim poziomie przedstawionych badań. To także świadectwo dużej dojrzałości naukowej Autorki rozprawy.

 3

Do oryginalnych i szczególnie istotnych osiągnięć Doktorantki należy zaliczyć:

- opracowanie metody analitycznej, umożliwiającej analizę utraty stateczności dynamicznej wielowarstwowych struktur laminowanych oraz płyt z porowatych materiałów gradientowych (dla przyjętej teorii płyt i określonych warunków brzegowych) i uzupełnienie jej o modele MES (dla dowolnych warunków brzegowych);
- przeprowadzenie kompleksowych obliczeń komputerowych ilustrujących wpływ wybranych parametrów analizowanych struktur na częstotliwości drgań własnych;
- sformułowanie problemu optymalizacji (maksymalizacja ciśnienia aerodynamicznego powodującego flutter) dla różnych definicji zmiennych decyzyjnych opisujących analizowane struktury i zbadanie zmienności przyjętego kryterium w zależności od wybranych parametrów;
- opracowanie trajektorii ciśnień krytycznych dla rozpatrywanych laminowanych konstrukcji wielowarstwowych umożliwiających wyznaczenie optimum i porównanie uzyskanych wyników dla przypadku płyt i cylindrycznych powłok małowyniostych.

4. Komentarze i uwagi krytyczne

Recenzent nie dostrzegł w pracy poważniejszych błędów natury merytorycznej. Przedstawione poniżej uwagi i sugestie dotyczą w głównej mierze aspektów redakcyjnych i mają na celu poprawę przejrzystości prezentacji rozważanego zagadnienia (i ewentualnie przyszłych prac naukowych Doktorantki). Są one istotne dla odpowiedniego odbioru pracy i lepszego zrozumienia niektórych fragmentów. Uwagi i komentarze przedstawiono starając się zachować kolejność rozdziałów, ale nie dzieląc ich na mniej lub bardziej ważne.

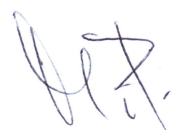
- 1) Tytuł rozprawy mówi o "optymalnym projektowaniu konstrukcji" i jest bardzo ogólny. Dodanie w nim informacji o rodzaju analizowanych struktur (np. "z materiałów niejednorodnych"?) byłoby bardziej precyzyjne.
- 2) Wszystkie symbole i oznaczenia w pracy o charakterze monografii wymagają opisu oraz objaśnienia - nawet dla tak znanych równań jak (1.1). Doktorantka kilkakrotnie zaniedbała ten aspekt. Przedstawiony na str. 7 i 8 wykaz ważniejszych oznaczeń nie zwalnia w moim przekonaniu z konieczności wyjaśnienia w tekście oznaczeń gdy pojawiają się one po raz pierwszy. Jako przykład wskazać można τ w równaniu (2.25) kojarzone zazwyczaj z naprężeniami ścinającymi, na str. 48 i 49 brakuje np. e_p , J , K , C_{ijkl}^0 , w równaniu (4.10) warto by wytłumaczyć znaczenie indeksów ω_i oraz ω_{i-1} oraz ujednoczyć oznaczenia wektora zmiennych decyzyjnych (pisanego jako s ze strzałką u góry w (4.3) i (4.4), s wytłuszczone w równaniach (4.9) i (4.10) a później jako składowa s_i - bez określenia, która to składowa). Autorka nie podaje też znaczenia Λ_e w (4.12) ani M "z daszkiem" w (5.3).
- 3) Niektóre z symboli wykorzystywanych w pracy nie są jednoznaczne (np. η występuje jako współczynnik śledzenia i typ gradacji materiału, N to siła i liczba warstw laminatu, γ to kąt krzywizny powłoki i stosunek ciepła właściwego gazu).
- 4) Brak jest interpunkcji w zdaniach zawierających wyrażenia i wzory matematyczne (wyjątkiem jest kilkanaście zdań w rozdz. 2 i 3).
- 5) Tytuł rozdziału 2 "Wprowadzenie do podstaw mechaniki materiałów kompozytowych" można by uprościć eliminując "podstaw" albo "Wprowadzenie do".



- 6) Na początku rozdziału 2.3 wskazane byłoby jasne zdefiniowanie analizowanego dalej obiektu (geometria, warunki brzegowe, działające obciążenia, ...). Wyjaśnienia wymaga pojęcie "typowy element". Na początku jest mowa o płycie ale na rysunku pojawia się powłoka cylindryczna.
- 7) W pracy Autorka zamieściła wiele rysunków z opisem w języku angielskim, pochodzących z artykułów jej współautorstwa. Ponieważ praca pisana jest w języku polskim wskazane jest co najmniej ich przetłumaczenie (np. w legendach rysunków).
- 8) Tytuł podrozdziału 4.1 (podobnie jak tytuł całego rozdziału) jest bardzo ogólny i obszerny ale zawiera jedynie klasyfikację zagadnień optymalizacji rozważanych w pracy. Z perspektywy recenzenta (zajmującego się optymalizacją od wielu lat) warto byłoby zawęzić ten tytuł do omawianego zagadnienia.
- 9) Niepotrzebna jest zamieszczona na początku podrozdziału 4.1 numeracja zagadnień optymalizacji (str.47) - wystarczający i bardziej czytelny byłby np. schemat blokowy.
- 10) W ogólnym (jak sugeruje tytuł rozdziału 4.1) sformułowaniu problemu optymalizacji pojawia się konieczność zdefiniowania "płaszczyzny zmiennych decyzyjnych". W ogólnym przypadku można mówić o przestrzeni lub dziedzinie. Wprowadzenie w tym miejscu co najmniej niestandardowego terminu "płaszczyzna zmiennych decyzyjnych" wymaga komentarza i wyjaśnień. Ponadto w zagadnieniach projektowania laminatów, oprócz wymienionych równości i nierówności, pojawić się mogą ograniczenia dotyczące zmiennych dyskretnych (jak np. wymóg ściśle zdefiniowanych kątów ułożenia włókien). W ogólnym sformułowaniu nie ma o tym wzmianki, ale Doktorantka podaje je już na następnej stronie w postaci równania (4.2).
- 12) W rozdziale 4 zauważyć można kilka mało precyzyjnych sformułowań jak np. "problem jest przekształcony na zadanie..." (str.48), "modelowanie elementów skończonych", "interpolowanie z punktów" (str. 51), "rozwiązania dla n problemów optymalizacji" (str.59).
- 13) Termin "formy drgań" który pojawia się na stronie 51 i często używany w dalszej części pracy nie jest najlepiej dobrany w kontekście rozprawy. W literaturze polskojęzycznej zdecydowanie częściej mówi się o postaciach drgań.
- 14) Brak opisów osi na Rys.4.5 utrudnia interpretację funkcji charakteryzujących laminat i pojęcia płaszczyzny decyzyjnej. Podobnie nie ma opisanych osi na wykresach z rysunków 5.3, 5.5 i 5.7. Recenzent odnalazł brakujące informacje w zacytowanych przez Autorkę pracach jednak rozprawa doktorska nie powinna zmuszać do takich zabiegów.
- 15) Niepotrzebne jest używanie słowa "odniesienie" podczas cytowania źródeł w tekście tak jak np. jak na stronie 58 " odniesienia [158, 163-169, ...]".
- 16) Mało zrozumiałe jest użycie w tytule rozdziału 4.3.3 określenia "struktury nanokompozytowe" nie będące przedmiotem rozważań w doktoracie.
- 17) Podobne wątpliwości pojawiają się w odniesieniu do ostatniego akapitu ze str. 60 (rozd.4.5) w którym zamieszczono zdanie "W niniejszej pracy uwaga zostanie skupiona na rozszerzeniu analizy optymalizacji na obszar niepewności właściwości mechanicznych materiałów kompozytowych". Ponadto ogólny wykres z Rys.4.6 i opis "optymalizacji w środowisku rozmytym" (str.61) również sprawiają wrażenie niezwiązanych z tematem rozprawy i nie mają kontynuacji w dalszych rozdziałach.



- 18) Tytuł rozdziału 5 "Projektowanie płyt kompozytowych" powinien być poprzedzony np. słowem "optymalne" aby dokładniej odzwierciedlić zawartą w nim treść. Ponadto rozdział ten przedstawia aspekty badania ekstremum funkcji w zależności od wybranych parametrów płyt warstwowych ale w przypadku płyt "FGM" ukazuje jedynie zależność parametrów flatteru od wybranych właściwości obciążenia, zamocowania i zmian porowatości.
- 19) Znacznym ułatwieniem do zgłębiania treści rozdziału 5 byłoby już na początku bardziej szczegółowe opisanie analizowanych zagadnień (tj. zdefiniowanie warunków brzegowych i obciążeń działających na obiekt oraz cel obliczeń). Rys. 5.1 pokazuje jedynie ogólnie geometrię i zawiera słowo "przeptyw".
- 20) Na str. 63 w linii 2 (od dołu) brak słowa "własnych" po "problem wartości".
- 21) Równanie (5.9) powinno być uzupełnione o kolumnowy wektor o składowych 0, aby mówić o problemie własnym.
- 22) Na str. 77 w linii 3 od dołu pojawia się nagle pojęcie "prędkości obrotowej", odniesione w nawiasie do wartości $\beta=0$.
- 23) Trajektorie określone w podpisie pod Rys.5.1 jako "trajektorie optymalne" są w rzeczywistości trajektoriami ciśnień. W tym miejscu przydałaby się bardziej rozbudowana analiza pokazanych na rysunku punktów "Minimum" i "Maximum".
- 24) Podpis "Odchylenia temperatur krytycznych ..." pod Rys 5.20 nie jest zbyt precyzyjny - lepiej brzmiałby termin "Zmiany". Podobnie nieprecyzyjnie brzmi podpis "Odchylenia ciśnień krytycznych" pod Rys.5.23 .
- 26) W przypadku pierwszych analizowanych w rozdziale 5.4 płyt "FGM nie zamieszczono informacji o ich geometrii", później (Rys. 5.25) jest mowa o płytach prostokątnych, a na wykresach rozdziału 5.4 nie podano jednostek.
- 27) Tytuł rozdziału 6 "Optymalne projektowanie laminowanych paneli cylindrycznych" należałoby uzupełnić o termin "małowyniostych".
- 28) Wniosek nr 8 (str.95) należałoby uzupełnić o zakres stosowalności wspomnianych metod analitycznych.
- 29) Streszczenia nie zawierają krótkiego podsumowania osiągniętych wyników ani wniosków.
- 30) W nazewnictwie dotyczącym zagadnień omawianych w pracy stosować należałoby ogólnie przyjęte w literaturze fachowej określenia:
- "metody obliczeniowe" a nie "liczbowe" (str.19),
 - "energia kinetyczna" a nie "kinematyczna" (str.7, 32, 64),
 - "teoria płyt i powłok Kirchhoffa-Love'a" a nie "Love'a-Kirchhoffa" (str. 33, 43, ...),
 - "panel cylindryczny" a nie "cylindryczna" (str.8, 33, 40, ..),
 - "laminat kątowy" zamiast angielskiego "angly-ply" (str.56),
 - "funkcje sklepane" a nie "klejone" (str.59),
 - "problemy aero-termo-sprężyste" a nie aerotermostoelastyczne (str.60),
 - "obciążenia ściskające" a nie "kompresyjne" (str.78),
 - "powłoki małowynioste" a nie "płytkie" (cały rozdział 6),
 - "macierz tłumienia" a nie "tłumiąca" (str.86).



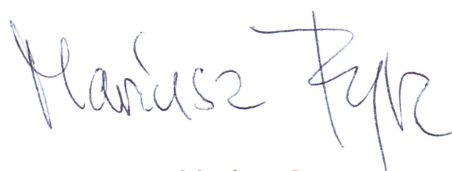
31) Rozdziały 5 i 6, prezentujące opublikowane wcześniej rezultaty obliczeniowe są bardziej dopracowane, zrozumiałe i stosunkowo łatwe do czytania. W innych pojawiają się jednak czasami mało precyzyjne sformułowania jak np. "suma sił jest nachylona" (str. 12), "początkowe zaburzenie belki" (str. 12), "postacie drgań narastają" (str.13), "FGM mogą być nowatorską koncepcją optymalizacji" (str. 27), "płyta poddana obciążeniu jednorodnej temperatury" (str.64), "naprężona płyta" (str. 75), "wielkość temperatury" (str.79), "wzrost właściwości materiału" (str.80), "mocniejszego materiału jednorodnego" (str.81), "płaska płyta" (str.86). Można czasami odnieść wrażenie, że redagowaniu pracy towarzyszył pośpiech. Niektóre niedociągnięcia w terminologii wynikają z bezpośredniego tłumaczenia na język polski pojęć, opublikowanych w literaturze anglojęzycznej.

5. Opinia końcowa

Tematyka rozprawy jest aktualna i ważna. Zaliczyć ją należy do dyscypliny inżynieria mechaniczna. Doktorantka rozwiązała sformułowany problem naukowy i przedstawiła oryginalne wyniki, które uzupełniają aktualny stan wiedzy. Mgr inż. Justyna Anna Flis wykazała pełne przygotowanie do dalszej, samodzielnej pracy naukowej.

Zaprezentowane w rozprawie osiągnięcia naukowe spełniają wymagania stawiane aktualnie pracom doktorskim. Uwagi krytyczne przedstawione w recenzji nie umniejszają poziomu naukowego pracy. Poziom merytoryczny rozprawy oceniam bardzo wysoko. Dorobek publikacyjny doktorantki świadczy o uznaniu środowiska naukowego i poziomie przedstawionych badań. Stwierdzam zatem, że recenzowana rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim oraz przepisom zawartym w obowiązującej Ustawie o Stopniach i Tytułach Naukowych.

Wniosuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr inż. Justyny Anny Flis p.t. *"Optymalne projektowanie konstrukcji w przypadku utraty stateczności dynamicznej - zjawisko flatteru dla nadkrytycznych prędkości płynu"* oraz dopuszczenie jej do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.



Mariusz Pyrz