



Rzeszów 29.06.2020

## RECENZJA

### Rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Falkowicz

pt. „Analiza pokrytycznych ścieżek równowagi ściskanej kompozytowej płyty z wycięciem o zadanych ugięciach wstępnych”.

**Promotor rozprawy: dr hab. inż. Hubert Dębski, Prof. PL**

**Promotor pomocniczy: dr inż. Mirosław Ferdynus**

*Recenzję opracowano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej dr hab. inż. Piotra Budzyńskiego, profesora uczelni – pismo z dnia 26 maja 2020r.*

### 1. Charakterystyka rozprawy, metodyka badań

Przedstawiona do mojej oceny rozprawa doktorska pt. „Analiza pokrytycznych ścieżek równowagi ściskanej kompozytowej płyty z wycięciem o zadanych ugięciach wstępnych” dotyczy badań cienkościennych ustrojów nośnych wykonanych z kompozytów węglowych, poddawanych ściskaniu, pracujących w warunkach pokrytycznych stanów deformacji, o wymuszonych postaciach. Analizowane ustroje poddano badaniom eksperymentalnym oraz opracowano modele obliczeniowe i przeprowadzono stosowne analizy nieliniowe, przy wykorzystaniu oprogramowania opartego na metodzie elementów skończonych.

Badania eksperymentalne przeprowadzono przy użyciu urządzeń zapewniających wymaganą precyzję pomiarów, w tym skanerów optycznych. Do badań użyto modeli o wysokiej jakości wykonania, co zapewniało wymaganą powtarzalność ich właściwości mechanicznych.

Zasadniczym celem badań było opracowanie metody uzyskiwania stabilnej postaci deformacji pokrywicznych, odpowiadającej wyboczeniu giętno-skrętnemu oraz określenie wpływu zmian wybranych parametrów geometrycznych oraz układu warstw kompozytu na przebiegi reprezentatywnych ścieżek równowagi, stanowiących zależności pomiędzy wybranym parametrem stanu – maksymalną wartością ugięcia zginanych pasów badanego ustroju oraz parametrem kontrolnym – wartością siły ściskającej.

Uzupełnieniem badań eksperymentalnych było opracowanie adekwatnych metod modelowania numerycznego zjawisk zachodzących podczas pracy badanych ustrojów, pozwalających na uzyskanie dystrybucji parametru krytycznego wg kryterium Tsai-Wu.

W pracy w sposób precyzyjny sformułowano poszczególne jej cele, których realizacja pozwoliła na udowodnienie słuszności tezy naukowej.

Wybór obiektów stanowiących przedmiot badań wydaje się uzasadniony, zarówno z uwagi na coraz szersze zastosowanie kompozytów w różnych dziedzinach techniki, jak i konieczność poszukiwania nowych, nie stosowanych wcześniej rozwiązań konstrukcyjnych. Należy podkreślić, że struktury kompozytowe, z uwagi na korzystne relacje pomiędzy masą i właściwościami mechanicznymi stosowane są nie tylko w obszarach życia codziennego, ale również w sektorze lotniczo-kosmicznym, charakteryzującym się bardzo wygórowanymi wymaganiami w zakresie bezpieczeństwa. Z uwagi na zjawiska zachodzące w warunkach lotu oraz związane z nimi charakter pracy struktur nośnych statków powietrznych i kosmicznych, konieczne jest poszukiwanie elementów konstrukcji będących w stanie absorbować energię w sposób ściśle kontrolowany. Z tego punktu widzenia, zaproponowany w pracy rodzaj ustroju wydaje się mieć charakter wysoce użyteczny.

Praca podzielona została na osiem rozdziałów, uzupełnionych spisem literatury oraz streszczeniami w języku polskim i angielskim, jak również wykazem ważniejszych symboli i oznaczeń.

Pierwszy z rozdziałów zawiera bardzo obszerny przegląd literatury, podzielony tematycznie na podrozdziały dotyczące stateczności ustrojów cienkościennych, mechaniki laminatów oraz analizy zagadnień stateczności w ujęciu metody elementów skończonych. Studium to zawiera usystematyzowany przegląd teorii naukowych dotyczących analizowanego zagadnienia oraz wykazuje, iż dostępna literatura nie zawiera wyników analiz ustroju podobnego do zaproponowanego w rozprawie.

Drugi z rozdziałów określa zasadnicze cele badawcze oraz tezę naukową rozprawy. Jak wcześniej wspomniano, poszczególne etapy badań zostały tutaj określone w sposób bardzo jasny i precyzyjny. Biorąc pod uwagę stopień złożoności zagadnienia, zakres badań nie budzi

zastrzeżeń, a nawet wydaje się wykraczać poza ramy wymagań stawianych tego rodzaju opracowaniom.

Rozdział trzeci zawiera krótkie kompendium teorii mechaniki laminatów, precyzując podstawowe założenia teorii stateczności elementów płytowych oraz podając stosowne zestawy równań. Zwrócono tutaj uwagę na fizyczną interpretację poszczególnych składowych macierzy sztywności w związkach konstytutywnych.

Rozdział czwarty stanowi szczegółowy opis modeli użytych do badań eksperymentalnych. Określono założenia odnośnie formy geometrycznej oraz zakresu zmienności wybranych parametrów. Opisano również istotę wewnętrznej struktury analizowanych obiektów oraz określono zasadnicze cechy dwóch ich rodzajów, wynikające z układu warstw laminatu. Określono różnicę pomiędzy modelami o układach symetrycznych i niesymetrycznych, poprzez szczegółowy opis wpływu orientacji warstw na postać macierzy sztywności w równaniach konstytutywnych. Przedstawiony został również sposób tworzenia modeli do badań eksperymentalnych, z uwzględnieniem mechanizmu wpływu konfiguracji warstw laminatu na właściwości mechaniczne kompozytu.

Rozdział piąty opisuje metodykę analiz numerycznych opartych na metodzie elementów skończonych, odnosząc się do podstaw teoretycznych dotyczących wykorzystanych procedur. Rozważania te posiadają formę bardzo skróconą, sprowadzając się do opisu istoty problemu własnego, na którym osadzona jest zlinearyzowana analiza wyboczeniowa oraz metody Newtona-Raphsona, stanowiącej podstawowe narzędzie numeryczne w przypadku analiz nieliniowych. W rozdziale określono również zasady tworzenia przyjętych modeli numerycznych, rodzaj wykorzystanych elementów skończonych oraz schemat warunków brzegowych i sposobu aplikacji obciążenia. Opisano sposób uzyskiwania wstępnej imperfekcji geometrycznej w analizie nieliniowej, poprzez wykorzystanie wyników zlinearyzowanej analizy wyboczeniowej.

Rozdział szósty stanowi obraz metodyki przeprowadzonych eksperymentów. Przedstawia opis stanowiska do badań oraz sposobu pomiaru przemieszczeń przy użyciu skanera optycznego. Podano również, w formie stosownej tabeli, wykaz zastosowanych rodzajów modeli eksperymentalnych, uwzględniający ich oznaczenia oraz odpowiadające im konfiguracje warstw laminatu.

Kolejny, siódmy rozdział, zawierający opis wyników badań, stanowi właściwe jądro rozprawy i jej, bez wątpienia, najbardziej wartościowy jej fragment. Rozdział podzielono na dwie zasadnicze części, poświęcone odpowiednio badaniom ustrojów o symetrycznym oraz niesymetrycznym układzie warstw laminatu. W każdej z nich zawarto podrozdziały dotyczące

analiz stanu krytycznego oraz pokrytycznego. Jak podkreślono, w przypadku układu symetrycznego naturalną najniższą postacią wyboczenia jest postać giętą. Wymuszenie postaci wyższej, giętno-skrętnej skutkuje naturalnym ograniczeniem wielkości strzałki ugięcia każdego z pasów struktury, znacząco zwiększając zakres przenoszonych przez ustrój obciążeń. W pierwszej kolejności określono wartości obciążeń krytycznych poszczególnych rodzajów modeli oraz szczegółowo zbadano ich zależności od zmian parametrów geometrycznych otworu. Podrozdziały odnoszące się do stanów pokrytycznych zawierają zestawienia reprezentatywnych ścieżek równowagi uzyskanych na drodze eksperymentalnej i numerycznej, dla poszczególnych wariantów układu warstw oraz kombinacji parametrów geometrycznych otworu. Uwagę zwraca wysoka zgodność otrzymywanych rezultatów eksperymentu oraz nieliniowych analiz numerycznych, co potwierdza poprawność formułowania i rozwiązywania problemów numerycznych. Wykazano również, że niektóre z wariantów badanych struktur nie mogą znaleźć technicznego zastosowania, z uwagi na brak możliwości wymuszenia wyższej postaci wyboczenia, spowodowanego zbyt dużą różnicą poziomów energetycznych odpowiadających postaci naturalnej oraz wymuszonej. Udowodniono zatem, że w przypadku struktur o symetrycznych układach warstw laminatu, nie jest możliwe opracowanie uniwersalnej metody uzyskiwania giętno-skrętnej postaci wyboczenia. Wymusiło to konieczność przeprowadzenia badań ustrojów o układach niesymetrycznych. Wykazały one, iż poprzez odpowiedni dobór układu i orientacji warstw możliwe jest uzyskanie pożądanej postaci wyboczenia jako naturalnej, odpowiadającej obciążeniu krytycznemu. Przedstawione w rozdziale zestawienia wyników są czytelne i zawierają kompletną informację o charakterze jakościowym oraz ilościowym. Stanowią również przekonujący dowód słuszności tezy naukowej.

Rozdział ósmy zawiera podsumowanie omówionych wyników oraz uwagi dotyczące ewentualnych form kontynuacji przeprowadzonych dla potrzeb rozprawy badań.

Należy podkreślić, że zaprezentowane metody badań, dobór narzędzi badawczych, jak również metodyka obliczeń numerycznych wydają się adekwatne i uzasadnione. Wszystkie badania oraz obliczenia numeryczne stanowią oryginalne osiągnięcie autorki rozprawy.

## **2. Ocena rozprawy**

Analizy badawcze struktur cienkościennych, pracujących w zakresie deformacji pokrytycznych, są na ogół bardzo kłopotliwe, zarówno w zakresie realizacji stosownych

eksperymentów, jak i zadań numerycznych. W przypadku struktur kompozytowych są one szczególnie wymagające, z uwagi na złożoność zagadnienia oraz trudności w realizacji doświadczenia i doboru właściwej metodyki obliczeniowej. Pamiętając o tym, pracę p. mgr inż. Katarzyny Falkowicz ocenić należy bardzo wysoko. Na szczególne uznanie zasługuje jednak sama oryginalna koncepcja badanego ustroju, który sam w sobie stanowi bardzo ciekawe i nowatorskie rozwiązanie.

Z uwagi na obszerny zbiór czynników określających właściwości mechaniczne obiektu, konieczny był bardzo umiejętny dobór metodyki badań, precyzyjne określenie ich niezbędnego zakresu oraz równie precyzyjna realizacja. Wszystkie te wymagania zostały spełnione. Zarówno eksperymenty, jak i analizy numeryczne, zrealizowane zostały w sposób staranny i metodyczny, co pozwoliło na udowodnienie słuszności postawionej tezy naukowej. Doktorantka udowodniła, że posiada szeroką wiedzę w zakresie prezentowanej problematyki oraz wysokie umiejętności wymagane w przypadku prowadzenia badań eksperymentalnych przy użyciu nowoczesnych narzędzi badawczych. Udowodniła również umiejętność posługiwania się wybranym rodzajem oprogramowania i formułowania oraz rozwiązywania złożonych problemów numerycznych.

Struktura rozprawy oraz sposób prezentacji wyników nie budzą zastrzeżeń, należy jednak zwrócić uwagę na pewne jej niedoskonałości:

- Już we wstępie Autorka formułuje kilka tez dotyczących kompozytowych ustrojów nośnych, z którymi trudno się w pełni zgodzić. Fakt, iż ustroje takie zachowują charakterystyki sprężyste aż do momentu zniszczenia, nie sygnalizując początku procesu uszkodzeń, trudno uznać za ich zaletę. Z kolei stwierdzenie, iż zastosowanie elementów usztywniających w postaci niejednorodności geometrycznych prowadzi do wzrostu masy struktury, w wielu przypadkach nie jest słuszne.

- Rozdział poświęcony przeglądowi literatury wydaje się zbyt obszerny. Stanowi rodzaj eseju poświęconego nie tylko strukturom kompozytowym, ale również samym ustrojom cienkościennym. Pomimo jednak bardzo szerokiego zakresu cytowanych pozycji, fragment poświęcony metodzie elementów skończonych nie zawiera przykładowo odniesienia do prac tak fundamentalnych, jak dzieło K.J. Bathe.

- Podczas redagowania rozprawy Autorka nie zastosowała się do powszechnie przyjętej zasady odmieniania cytowanych nazwisk. W niektórych przypadkach odstępstwo od niej jest uzasadnione, jednakże należy wówczas stosować jednorodny schemat.

- Formuły (3.1) obarczone są błędem edycyjnym. Prawe strony równań powinny zawierać przecinki oznaczające pochodne w notacji wskaźnikowej.



- W podrozdziale (4.2) podano wartości wielkości określających właściwości mechaniczne kompozytu. Stwierdzono, iż zostały one wyznaczone zgodnie z normami ISO. Z treści nie wynika jednak czy określone zostały one przez Doktorantkę na drodze stosownego eksperymentu, czy też wykorzystano dane pozyskane z literatury.

- W tym samym podrozdziale użyto określenia „modele fizyczne” w odniesieniu do kompozytowych modeli do badań eksperymentalnych. Określenie takie wydaje się niezbyt fortunate.

- W opisie analiz numerycznych nie określono rozmiaru zadań, choćby poprzez podanie liczby zastosowanych elementów.

- W rozdziale szóstym, poświęconym opisowi eksperymentu brakuje perspektywicznego schematu graficznego ilustrującego ideę przyjętych warunków brzegowych i ich wpływu na deformację układu. Zamieszczone rysunki nie ilustrują w sposób zadowalający istoty wykonanego doświadczenia.

- Autorka wielokrotnie używa sformułowania „ilość warstw”. Termin „ilość” używany jest zwyczajowo w odniesieniu do wielkości niepoliczalnych, natomiast w tym przypadku znacznie bardziej trafne byłoby określenie „liczba warstw”.

- Niektóre z opisów wielkości prezentowanych na rysunkach w postaci warstw nie zostały poprawnie opisane. Przykładowo, rysunki 7.19-7.21 opisano jako: „formy deformacji pokrytycznej”. W istocie, jak można się domyślać, chodzi tutaj o przemieszczenia na kierunku prostopadłym do płaszczyzny niezdeformowanego ustroju.

- Zależności pomiędzy ugięciem pasów oraz siłą obciążającą ustrój nazwano ścieżkami równowagi. Jest to określenie bardzo uproszczone, stanowiące rodzaj skrótu myślowego. W rzeczywistości ścieżka równowagi układu jest relacją pomiędzy zbiorem parametrów określających jego stan oraz tzw. parametrów kontrolnych, związanych z obciążeniem. W przypadku układu o  $n$ -stopniach swobody, stanowi ona hiperpowierzchnię w  $n$ -wymiarowej hiperprzestrzeni stanu. Zaprezentowane wykresy można nazwać co najwyżej „reprezentatywnymi ścieżkami równowagi”.

### 3. Podsumowanie

Pomimo wymienionych powyżej uwag, rozprawa p. mgr inż. Katarzyny Falkowicz zasługuje na bardzo wysoką ocenę, a zaprezentowane w niej wyniki badań wydają się wartościowe zarówno z poznawczego, jak i utylitarnego punktu widzenia. Biorąc pod uwagę

całość pracy, stwierdzam iż spełnia ona wymagania stawiane przez ustawę z dnia 14 marca 2003 roku „o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytułach w zakresie sztuki” ( Dz. U. nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami). Na tej podstawie składam wniosek o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony. Ponadto, biorąc pod uwagę walory rozprawy, wnioskuję o jej wyróżnienie.

*Tomasz Kopecki*