

prof. dr hab. inż. Maria Kotelko
Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji
Wydział Mechaniczny, Politechnika Łódzka
ul. B. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź
maria.kotelko@p.lodz.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Smagowskiego

pt.: ” *Eksperymentalna weryfikacja obciążeń bifurkacyjnych krótkich słupów laminowanych o przekroju zetowym podlegających równomiernemu skróceniu* ”

Podstawę do opracowania niniejszej recenzji stanowi pismo Zastępcy Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej, Pana dr hab. inż. Jarosława Bieniasia z dnia 12. października 2022r.

1. Przedmiot rozprawy

Materiały kompozytowe, w tym między innymi laminaty włókniste znajdują w ostatnich dekadach coraz szersze zastosowanie w wielu gałęziach techniki, mianowicie w przemyśle samochodowym (pojazdach), w lotnictwie, w budowie statków morskich i łodzi żaglowych, statków kosmicznych, w budownictwie a także w produkcji sprzętu sportowego oraz w medycynie. Mają one szczególnie zastosowanie w elementach lekkich konstrukcji cienkościennych. O nośności takich konstrukcji decyduje w większości przypadków ich stateczność. Zatem określenie ich obciążeń krytycznych jest kluczowe. W przypadku cienkościennych elementów konstrukcyjnych zbudowanych z laminatów włóknistych zarówno teoretyczna, jak i doświadczalna analiza obciążeń krytycznych jest ciągle zagadnieniem nie w pełni rozwiązany.

Przedmiotem recenzowanej rozprawy jest analiza eksperymentalna obciążeń krytycznych ściskanych, krótkich, kompozytowych słupów o przekroju zetowym. Przedmiot pracy wpisuje się w najnowsze trendy badań w dziedzinie stateczności i nośności konstrukcji cienkościennych wykonanych z materiałów kompozytowych.

2. Treść rozprawy

Praca składa się z siedmiu rozdziałów, spisu literatury (bibliografii) cytowanej w tekście, zawierającej 152 pozycje, oraz streszczeń w języku polskim i angielskim, a także aneksu zawierającego uszczegółowione wykresy, na podstawie których wyznaczono obciążenia krytyczne. Ogółem praca zawiera 107 stron.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do rozprawy, w którym omówiono ogólnie zagadnienie będące jej przedmiotem.

Rozdział drugi zawiera przegląd stanu wiedzy w przedmiocie rozprawy. Przegląd jest podzielony tematycznie na kilka części zawierających omówienie, kolejno, zagadnienia obciążeń bifurkacyjnych struktur izotropowych, wyboczenia interakcyjnego, obciążeń bifurkacyjnych struktur kompozytowych (laminatów, FML i FGM). W osobnych podpunktach Autor omawia stan wiedzy w obszarze symulacji numerycznych MES oraz badań eksperymentalnych.

W rozdziale 3-m Doktorant formułuje tezę i cel pracy. W rozdziale 4-m omówiono zachowanie się cienkościennych struktur wykonanych z kompozytów włóknistych, poddanych ścisaniu. Opisano ścieżki równowagi takich struktur. Następnie przedstawiono związki konstytutywne dla laminatów włóknistych w postaci macierzowej. W ostatnim podpunkcie tego rozdziału Autor bardzo szczegółowo omawia metody doświadczalne wyznaczania obciążeń krytycznych.

Rozdział 5-ty zawiera opis modelu numerycznego MES oraz wyniki analizy numerycznej obciążeń bifurkacyjnych słupów kompozytowych, będących przedmiotem badań, tj. prętów o przekroju zetowym, poddanych równomiernemu ścisaniu, wykonanych z laminatu włóknistego o matrycy epoksydowej wzmocnionej włóknem węglowym. Laminat składał się z 18-tu warstw o czterech różnych konfiguracjach ułożenia włókien. Przedstawiono wyniki analizy liniowej (zdania o wartościach własnych) oraz analizy nieliniowej stanu zakrytycznego. W analizie nieliniowej uwzględniono 4 różne wartości amplitudy ugięć wstępnych. Przytoczono wyniki obliczeń obciążeń krytycznych, przeprowadzonych na podstawie otrzymanych wykresów siła – skrócenie oraz ścieżek równowagi (siła -ugięcie), przy zastosowaniu pięciu różnych metod wyznaczania obciążeń krytycznych, tj. dwóch wariantów metody przecięć, punktu przegięcia, metody Koitera oraz metody $P-w^2$. Wyniki przedstawiono w postaci licznych wykresów.

W rozdziale 6-tym (w mojej opinii najważniejszym w treści rozprawy) zawarto szczegółowy opis badań doświadczalnych i ich wyniki. Autor opisał technologię wykonania słupów do badań, wyniki badań parametrów mechanicznych laminatu oraz stanowisko badawcze i przebieg badań. Następnie wymienił trzy metody doświadczalne zastosowane do wyznaczenia sił krytycznych na podstawie wyników badań, tj. metodę przecięć na wykresie siła skrócenie, metodę $P-w^2$ oraz metodę punktu przegięcia. Rozdział 6. zawiera bardzo szczegółowy opis wyników badań doświadczalnych w postaci wykresów siła skrócenie, ścieżek równowagi oraz wykresów $P - w^2$. Autor przedstawił też porównanie wartości obciążeń krytycznych wyznaczonych wspomnianymi wyżej metodami w postaci wykresów i tabel.

Rozdział 7-my zawiera podsumowanie i wnioski końcowe. Autor formułuje wnioski dotyczące dokładności zastosowanych metod szacowania obciążeń krytycznych oraz stosowalności tych metod przy różnych imperfekcjach wstępnych oraz dla różnych konfiguracji ułożenia warstw laminatu.

2. Ogólna ocena rozprawy

Doktorant podjął się jednego z najtrudniejszych i dotychczas nie w pełni rozwiązanych zadań w dziedzinie mechaniki eksperymentalnej, tj. doświadczalnego wyznaczania obciążeń krytycznych cienkościennych struktur, w szczególności struktur kompozytowych.

Zadanie to wykonał przeprowadzając zarówno eksperyment numeryczny MES, jak i badania doświadczalne na obiektach rzeczywistych (zetowych słupach kompozytowych z laminatu włóknistego poddanych równomiernemu ścisaniu). Przeprowadził badania dla czterech wariantów ułożenia warstw laminatu, dobranych tak, aby możliwa była analiza wpływu sprzężeń stanu błonowego i zgięciowego na obciążenia krytyczne, a także na stosowalność poszczególnych metod ich wyznaczania dla różnych przypadków sprzężeń. Przeprowadził bardzo szczegółowe obliczenia obciążeń krytycznych na podstawie wyników symulacji MES, stosując pięć różnych metod ich wyznaczania i dokonał kompleksowej analizy porównawczej wyników tych obliczeń.

Na szczególne podkreślenie zasługuje część rozprawy zawierająca wyniki badań doświadczalnych. Badania te przeprowadzono w sposób niezwykle staranny i kompleksowy (abstrahując od pewnych uwag krytycznych, podanych niżej). Odształcenia mierzono za

pomocą metody cyfrowej korelacji obrazu, co umożliwiło polowy pomiar i pozwoliło na wyznaczenie ugięć w paru wybranych punktach środka. Dla tych, wybranych punktów wyznaczono ścieżki równowagi i dokonano ich porównania. Dokonano bardzo szczegółowej analizy porównawczej oszacowania obciążeń krytycznych trzema różnymi metodami. Rozprawa zawiera bardzo obszerny zbiór wyników doświadczalnych oszacowania obciążeń krytycznych oraz analogicznych wyników otrzymanych na podstawie eksperymentu numerycznego, a także analizę porównawczą tych wyników, która pozwoliła Autorowi sformułować wnioski dotyczące stosowalności poszczególnych metod szacowania obciążeń krytycznych struktur cienkościennych zbudowanych z laminatów włóknistych. Stanowi to istotny wkład Doktoranta w rozwój doświadczalnych metod wyznaczania obciążeń krytycznych konstrukcji cienkościennych i wyczerpuje w mojej opinii wymóg ustawy, zawiera bowiem oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Zakres pracy jest kompletny i obejmuje zarówno opracowanie modelu numerycznego MES i przeprowadzenie symulacji numerycznych, jak i zbudowanie stanowiska badawczego, zaplanowanie procedury pomiarowej i przeprowadzenie badań doświadczalnych. Kandydat wykazał się zatem szeroką wiedzą z zakresu metod numerycznych mechaniki (MES), a także z zakresu metod eksperymentalnych mechaniki oraz umiejętnością planowania i wykonania eksperymentu.

Układ pracy jest przejrzysty, jej redakcja jest dość staranna, aczkolwiek budzi pewne zastrzeżenia, wymienione w następnym paragrafie. Bibliografia opracowana jest adekwatnie do tematu pracy. Biorąc powyższe pod uwagę, moja ogólna merytoryczna ocena rozprawy jest wysoka. Poniżej przedstawiłam uwagi krytyczne, które w większości mają charakter komentarzy dyskusyjnych i nie umniejszają mojej pozytywnej oceny pracy mgr inż. Wojciecha Smagowskiego.

3. Uwagi krytyczne

- 3.1. W uzasadnieniu tematu pracy (w podsumowaniu rozdziału drugiego) brakuje wyraźnego wskazania luki w obszarze badań związanych bezpośrednio z tematem rozprawy i mocnego uzasadnienia przedmiotu badań.
- 3.2. W sytuacji dużego rozrzutu wyników doświadczalnych oszacowania obciążeń krytycznych, nawet dla jednej serii pomiarowej, wskazany byłby pomiar ugięć wstępnych. Jak wiadomo, wyniki pomiaru obciążeń krytycznych zależą bardzo silnie od wielkości i charakteru imperfekcji wstępnych. Autor wspomina, że takie pomiary są przewidziane w dalszych badaniach. Tym nie mniej, gdyby takie pomiary zostały przeprowadzone, można by w sposób bardziej miarodajny zinterpretować wyniki oszacowania doświadczalnego obciążeń krytycznych. Przeprowadzono jedynie eksperyment numeryczny MES dla czterech różnych wartości imperfekcji wstępnych w analizie nieliniowej i porównano wyniki oszacowań siły krytycznej otrzymanych pięcioma metodami z wartością własną obciążenia krytycznego otrzymaną z analizy liniowej. To porównanie wskazało na silny wpływ imperfekcji wstępnych na oszacowania siły krytycznej otrzymane wspomnianymi wyżej metodami. Brak wyników pomiarów ugięć wstępnych badanych słupów uniemożliwił bardziej kompleksowe porównanie wyników otrzymanych z analizy nieliniowej MES (metodą punktu przecięcia, punktu przegięcia oraz $P-w^2$) z analogicznymi wynikami otrzymanymi z badań doświadczalnych. Porównano jedynie wyniki doświadczalne z wynikami otrzymanymi na podstawie symulacji MES dla jednej wartości amplitudy ugięcia wstępnego, tj. 0.4 mm. Ponieważ nie znano rzeczywistych wartości ugięć wstępnych, porównanie to może nie być w pełni adekwatne.

- 3.3. W rozdziale 7-m Autor stawia wniosek (cyt.): „ Wykazano, że obciążenie odpowiadające zmianie sztywności realnej struktury na wykresie siła w funkcji skrócenia z dostateczną dokładnością wyznacza obciążenie bifurkacyjne”. Przy otrzymanym maksymalnym błędzie ok. 30% jest to wniosek zbyt daleko idący.
- 3.4. Pozostaje otwarte pytanie , do którego Doktorant nie odnosi się we wnioskach, czy porównywanie obciążenia bifurkacyjnego (wartości własnej wyznaczonej z analizy liniowej) z wynikami otrzymanymi jedną z metod doświadczalnych opartych na wykresach ścieżek równowagi jest w pełni miarodajne, czy też nie należałoby wartości własnych traktować jedynie jako wstępnego oszacowania obciążenia krytycznego.
- 3.5. W badaniach doświadczalnych zastosowano prędkość obciążenia (przesuwu trawersy maszyny) 2mm/min. W badaniach tego typu stosuje się na ogół i zaleca mniejsze prędkości , tj. 1mm/min lub nawet mniejsze. W pracy nie wspomniano, czy były przeprowadzane wstępne próby przy różnych prędkościach obciążenia.
- 3.6. W podpunkcie 6.5. Autor wspomina, że były odczytywane wartości skrócenia w trzech różnych punktach przekroju poprzecznego słupa . Nie jest jasne, czy na wykresach siła – skrócenie (rys. 6.9) krzywe sporządzono dla wartości średnich? Byłoby wskazane zamieszczenie wykresów dla trzech punktów, dla których rejestrowano skrócenie, dla jednej przykładowej próby.

4. Uwagi edytorskie

Jak wspomniałam wyżej, redakcja rozprawy jest dość staranna. Jednakże jej przygotowanie edytorskie budzi pewne zastrzeżenia. Pewne niedociągnięcia edytorskie wynikają częściowo z ogromnej liczby danych, które Doktorant zaprezentował w postaci wykresów.

- 4.1. Brakuje pozycji literatury 153 i 154 , na które Autor kilkakrotnie powołuje się w tekście. Spis literatury zawiera 152 pozycje.
- 4.2. Pozycja literatury [39] jest prawdopodobnie błędnie podana na str. 14.
- 4.3. Praca zawiera szereg rysunków i wykresów bardzo mało czytelnych. W szczególności:
 - rys. 5.4 i 5.5 (zrzuty ekranu z kodu ABAQUS)
 - rys. 5.10 (bardzo istotny) jest mało czytelny i należałoby go powiększyć
 - ogólnie: legendy i opisy niemal wszystkich wykresów są mało czytelne, co utrudnia lekturę rozprawy,
 - zdjęcie na rys. 6.6. , które w zamiarze Autora ma ilustrować bezdotykowy pomiar przemieszczeń, nie wyjaśnia metody tego pomiaru
- 4.4. Tekst pracy zawiera kilka błędów literowych i składniowych. Jest ich co najmniej 8.
- 4.5. Recenzent rekomenduje przeredagowanie streszczenia w języku angielskim w dalszych ewentualnych publikacjach. M. in. sformułowań „*pre-deflections*” i „*work curves*” nie stosuje się w anglojęzycznej literaturze przedmiotu.

Wniosek końcowy

Dorobek publikacyjny Doktoranta obejmuje 3 publikacje (według bazy Scopus), co wypełnia wymogi ustawowe.

Biorąc pod uwagę wysoką ocenę rozprawy , przedstawioną powyżej, oraz dotychczasowy dorobek publikacyjny Doktoranta spełniający wymagania ustawowe,

stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Wojciecha Smagowskiego .pt: „Eksperymentalna weryfikacja obciążeń bifurkacyjnych krótkich słupów laminowanych o przekroju zetowym podlegających równomiernemu skróceniu” spełnia wszystkie warunki stawiane przez ustawę „Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce” z dn. 20.07. 2018 r. (Dz.U. poz. 1669) i na tej podstawie wnioskuję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Łódź, 12. stycznia 2023 r

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Dariusz K...' with a dotted line underneath.