



prof. dr hab. inż. Ewa Magnucka-Blandzi  
Instytut Matematyki  
Politechnika Poznańska  
ul. Piotrowo 3a,  
60-965 Poznań  
email: [ewa.magnucka-blandzi@put.poznan.pl](mailto:ewa.magnucka-blandzi@put.poznan.pl)

Poznań, 19 listopada 2019 r.



## OCENA

### rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Wymulskiego

„Analiza wpływu nieosiowości obciążenia na stateczność ściskanych cienkościennych profili kompozytowych”

(opinia sporządzona na podstawie pisma WM/373/2019 Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej z dnia 1 października 2019 roku)

#### 1. Informacje ogólne

- a. Promotor: dr hab. inż. Hubert Dębski, prof. PL
- b. Układ rozprawy doktorskiej
  - 143 strony,
  - 7 rozdziałów oraz streszczenie, wykaz ważniejszych oznaczeń i literatura (169 wymienionych prac, w tym 33 publikacje książkowe).

#### 2. Treść rozprawy, sformułowanie i rozwiązanie problemu naukowego

Przedmiotem rozprawy doktorskiej są ściskane, cienkościennie słupy kompozytowe o przekrojach ceowych oraz zetowych. Badania dotyczące wpływu zmian mimośrodowego obciążenia oraz konfiguracji warstw kompozytu na stateczność słupów przeprowadzono dwoma metodami: numeryczną (metodą elementów skończonych) oraz doświadczalną. Wyznaczono wartości obciążeń krytycznych, analizowano stan zakrytyczny aż do chwili wystąpienia pierwszych oznak niszczenia materiału kompozytowego. W doświadczalnych badaniach zastosowano metodę emisji akustycznej w celu wyznaczenia chwili, w którym rozpoczyna się niszczenie kompozytu, natomiast w numerycznych skorzystano z inicjacyjnych kryteriów zniszczenia. W analizie numerycznej uwzględniono również wpływ wartości amplitudy wstępnych imperfekcji geometrycznych na stateczność i zakrytyczne ścieżki równowagi ściskanych słupów kompozytowych. Ponadto, w pracy doktorskiej wskazano, że nieosiowość obciążenia konstrukcji jest jednym z czynników mających wpływ na przyspieszenie utraty stateczności oraz zniszczenie struktury materiału.

W pierwszym rozdziale odwołano się do wielu publikacji, w tym książkowych w celu opisanie wyników badań znanych z literatury i wskazania, że wyniki dotyczące ściskanych słupów kompozytowych





otrzymano przede wszystkim na podstawie analizy teoretycznej, w szczególności numerycznej. Zauważono, że niewiele wyników doświadczalnych badań jest opisanych w literaturze.

W drugim rozdziale Doktorant sformułował tezę i określił cel oraz zakres rozprawy.

W kolejnym rozdziale wskazano, że każda ze ścian analizowanych konstrukcji cienkościennych jest prostokątną płytą kompozytową, zatem przedstawiono założenia klasycznej teorii płyt wielowarstwowych.

W czwartym rozdziale przedstawiono ogólną ideę analizy numerycznej w odniesieniu do wartości obciążenia krytycznego, odpowiadającej jej postaci wyboczenia, oraz stanu zakrytycznego.

W piątym rozdziale szczegółowo omówiono przedmiotowe słupy kompozytowe. Przedstawiono schematy ceowych i zetowych słupów. Opisano cztery różne konfiguracje warstw laminatu zastosowane dla tych słupów oraz właściwości mechaniczne pojedynczej warstwy, czyli kompozytu węglowo-epoksydowego. Ponadto przedstawiono rozważany zakres zmienności obciążenia mimośrodowego w dwóch kierunkach: równoległym i prostopadłym do środka. Opisano sposób realizacji oraz zakres przeprowadzonych badań doświadczalnych. Przedstawiono dwie metody aproksymacyjne, których zastosowanie umożliwiło Doktorantowi wyznaczenie obciążenia krytycznego na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych. A pod koniec tego rozdziału opisano szczegółowo realizację badań numerycznych (metodą elementów skończonych) w systemie ABAQUS.

Szósty rozdział jest najważniejszą i najobszerniejszą częścią rozprawy, w którym przedstawiono wyniki badań numerycznych i doświadczalnych.

W ostatnim rozdziale Doktorant podsumowuje otrzymane wyniki oraz wskazuje na kierunek dalszych badań.

### 3. Ocena wartości naukowej rozprawy

Pan mgr inż. Paweł Wysmulski poprawnie sformułował tezę i wyraźnie określił cel oraz zakres rozprawy. Opisał problem stateczności ściskanych cienkościennych słupów kompozytowych o przekrojach ceowych i zetowych. Rozważył cztery różne konfiguracje warstw laminatu, z których wykonano rzeczywiste obiekty. Doktorant analizował przedmiotowe słupy nie tylko teoretycznie z wykorzystaniem metody elementów skończonych i systemu ABAQUS, ale również przeprowadził doświadczalne badania na opracowanym stanowisku laboratoryjnym. Stanowi to bardzo znaczącą i istotną część pracy. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że opracowano, wykonano i zastosowano specjalne głowice, które zapewniły w doświadczalnych warunkach realizację przegubowego podparcia słupów. Na tych głowicach zamocowano specjalnie zaprojektowane stoły przesuwne w celu realizacji mimośrodowego obciążenia poprzez odpowiednie pozycjonowanie słupa względem osi wytrzymałościowej maszyny. Doktorant badał wpływ zmiany mimośrodu obciążenia na stan krytyczny i zakrytyczny aż do chwili, w którym rozpoczyna się niszczenie kompozytu. W celu monitorowania bieżącego stanu struktury kompozytowego materiału zastosowano metodę emisji akustycznej do pomiaru sygnału. Na podstawie amplitudy sygnału oceniano stan tego materiału.

W drugim rozdziale rozprawy Doktorant opisał założenia klasycznej teorii płyt wielowarstwowych. Podał odpowiednie wyrażenia na odkształcenia normalne i postaciowe, jako liniowe związki pomiędzy





odkształceniami i przemieszczeniami. Dla pełnego opisu modelu teoretycznego płyty brakuje zdefiniowanego pola przemieszczeń (dodatkowo, np. rysunek dotyczący deformacji prostej normalnej do płaszczyzny środkowej płyty), z którego wynikają wspomniane odkształcenia.

W czwartym rozdziale jest opisana bardzo ogólnie metoda Newtona-Raphsona. Zastosowanie tej metody przez Doktoranta nie budzi żadnych wątpliwości. Natomiast opis kolejnych kroków metody wydaje się być niewystarczający. Brakuje informacji, czy ta metoda jest zbieżna dla dowolnego przybliżenia początkowego? W jaki sposób wybierany był punkt początkowy? Co stanowi ciąg kolejnych przybliżeń? – wynika to z wykresu, ale nie jest omówione w tym rozdziale. Co oznacza sformułowanie „rozwiązanie zbieżne” na rys. 4.1.? Czy stosując metodę Newtona-Raphsona należy odwracać macierz w każdym kroku iteracji? Czy można rozwiązać dany układ równań bez odwracania tej macierzy?

W szóstym rozdziale Doktorant wykazał na podstawie opisanych wyników przeprowadzonych badań numerycznych i doświadczalnych, że mimośród obciążenia i jego zmiana ma istotny wpływ na utratę stateczności przedmiotowych słupów kompozytowych, a to potwierdza sformułowaną tezę rozprawy. Wykazał również, że układ warstw w strukturze laminatu, kształt przekroju poprzecznego słupów, ugięcia wstępne mają również wpływ na stan krytyczny i zakrytyczny.

Na szczególną uwagę zasługuje również fakt, że wyniki badań numerycznych są zgodne z otrzymanymi doświadczalnie zarówno w przypadku wyznaczenia obciążeń krytycznych, zakrytycznych ścieżek równowagi statycznej oraz wartości siły powodującej uszkodzenie struktury kompozytowego materiału. W szczególności, otrzymane wyniki są zgodne dla słupów o przekrojach ceowych i zetowych dla czterech różnych układów warstw w strukturze laminatu.

Analiza utraty stateczności cienkościennych słupów kompozytowych jest istotna w projektowaniu takich konstrukcji. Doktorant wskazał, że odpowiedni układ warstw w strukturze laminatu, z którego wykonany jest cienkościenny słupek, ma wpływ na wartość obciążeń krytycznych i stan zakrytyczny.

#### **4. Ocena redakcyjna rozprawy**

Rozprawa doktorska jest czytelna, a jej układ przemyślany i logiczny. Rysunki i wykresy są przedstawione odpowiednio i stanowią istotną część w analizie wyników obszernych badań numerycznych i doświadczalnych.

W pracy można znaleźć nieliczne błędy edycyjne, przykładowo na str. 4 w wykazie oznaczeń jest odwołanie do rys. 4.2, który nie istnieje.

Pojawiają się też nieprecyzyjne sformułowania, przykładowo na str. 26 „najniższej postaci wyboczenia”.

Błędy edycyjne czy nieprecyzyjne sformułowania nie stanowią problemu w zrozumieniu przedstawionych treści, a zatem nie mają żadnego wpływu na wartość merytoryczną pracy.

#### **5. Wniosek końcowy**

Na podstawie przedstawionej rozprawy doktorskiej można sformułować wniosek, że Doktorant wykazał się wiedzą dotyczącą cienkościennych konstrukcji kompozytowych, zastosowania odpowiednich metod numerycznych oraz umiejętnością rozwiązania postawionego problemu, w tym



---

**POLITECHNIKA POZNAŃSKA**

---



**WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY**

**Instytut Matematyki**

ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, tel. +48 61 665 2320, fax +48 61 665 2348

e-mail: [office\\_math@put.poznan.pl](mailto:office_math@put.poznan.pl), [www.put.poznan.pl](http://www.put.poznan.pl)

przeprowadzenia doświadczalnych badań. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu ściskania przedmiotowych słupów, w szczególności przeprowadzenia doświadczalnych badań w celu weryfikacji opracowanych modeli numerycznych i wskazuje na wysoki poziom wiedzy z dyscypliny mechanika, a także na umiejętność prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata.

Można stwierdzić, że rozprawa doktorska mgra inż. Pawła Wysmulskiego spełnia warunki określone w Dzienniku Ustaw nr 65, poz. 595 z 14 marca 2003 z późn. zm. Zatem, na podstawie powyższego wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony.

*E. Prokud-Bland*

---