

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. Dawida Witkowskiego

pt.:” *Stateczność płyty prostokątnej o symetrycznie zmiennych właściwościach mechanicznych poddanej obciążeniom dynamicznym*”

Podstawę do opracowania niniejszej recenzji stanowi pismo Pana Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, dr hab. Olafa Ciszaka z dnia 06.07. 2022 r., wystosowane na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej z dnia 05.07.2022 r.

1. Przedmiot rozprawy

W ostatnich dekadach dokonał się znaczny postęp w zastosowaniu niekonwencjonalnych materiałów konstrukcyjnych, takich jak kompozyty włókniste, materiały typu FML , a także materiały gradientowe w elementach konstrukcji, szczególnie w lotnictwie, pojazdach i statkach. Wiąże się to również z postępowaniem w metodach analizy strukturalnej tych konstrukcji (analizy wytrzymałości, stateczności i nośności). Postęp w obszarze zarówno projektowania, jak i analizy nośności elementów konstrukcyjnych wykonanych z materiałów gradientowych jest w ostatnich latach szczególnie znaczący.

Przedmiotem recenzowanej rozprawy jest nośność płyty prostokątnej wykonanej z materiału gradientowego poddanej działaniu dynamicznych sił ściskających lub statycznemu ciśnieniu zewnętrznemu. W ramach recenzowanej pracy opracowano analityczne rozwiązania zagadnienia odpowiedzi dynamicznej płyty na zmienne w czasie obciążenia ściskające oraz zagadnienia rozkładu naprężeń (w tym efektu ścinania) w płycie poddanej statycznemu ciśnieniu zewnętrznemu. W obu przypadkach rozwiązania analityczne oparto na zaproponowanej hipotezie deformacji prostej normalnej do powierzchni środkowej płyty. Przeprowadzono także badania numeryczne Metodą Elementów Skończonych (MES) obu przypadków obciążenia płyty oraz badania numeryczne MES konstrukcji nośnej wagonu kolejowego, którego niektóre elementy wykonane są z materiału gradientowego. Praca zatem wpisuje się w najnowsze trendy analizy konstrukcji wykonanych z materiałów niekonwencjonalnych.

2. Treść rozprawy

Praca składa się z czterech rozdziałów poprzedzonych streszczeniem w języku polskim oraz spisem ważniejszych oznaczeń, spisu literatury (bibliografii) cytowanej w tekście, zawierającej 74 pozycje, oraz streszczenia w języku angielskim. Ogółem praca zawiera 106 stron.

Rozdział pierwszy stanowi wstęp do rozprawy, w którym omówiono nowoczesne materiały gradientowe oraz dokonano przeglądu stanu wiedzy w przedmiocie rozprawy. W następnych paragrafach tego rozdziału Autor przedstawił problemy związane z

projektowaniem konstrukcji nadwozia pojazdu szynowego oraz sformułował tezy i cele rozprawy. Tezami rozprawy są:

- możliwość sformułowania hipotezy deformacji prostej normalnej do powierzchni środkowej płyty o zmiennych własnościach materiałowych względem osi prostopadłej do jej powierzchni i zastosowania tej hipotezy do analizy strukturalnej płyty,

- możliwość zastąpienia niektórych elementów konstrukcyjnych z materiałów konwencjonalnych (stali) materiałami gradientowymi w nadwoziu pojazdu szynowego, co skutkuje poprawą własności wytrzymałościowych i eksploatacyjnych konstrukcji.

Rozdział 2. (najobszerniejszy) składa się z trzech podrozdziałów i obejmuje rozwiązania analityczne postawionych zagadnień, opis modeli numerycznych MES oraz porównawcze wyniki obliczeń analitycznych i numerycznych. W podrozdziale 2.1. Doktorant przedstawił przedmiot badań, tj. płytę prostokątną przegubowo podpartą na całym obwodzie i obciążoną siłami ściskającymi przyłożonymi w jej płaszczyźnie środkowej w dwu kierunkach równoległych do jej brzegów lub ciśnieniem zewnętrznym. Następnie omówił założony rozkład własności mechanicznych (modułów Younga i Kirchhoffa) wzdłuż grubości płyty oraz sformułował hipotezę deformacji prostej normalnej do płaszczyzny środkowej płyty w postaci funkcji deformacji, zastosowanej w funkcjach określających składowe stanu przemieszczenia płyty (funkcje przemieszczeń).

Podrozdział 2.1 zawiera następnie szczegółowy opis rozwiązania analitycznego. Autor formułuje wyrażenia na energię sprężystą, pracę sił zewnętrznych oraz energię kinetyczną płyty i oblicza ich wariacje. Wychodzą z zasady Hamiltona wyprowadza układ równań ruchu, który sprowadza do jednego, zwyczajnego, nieliniowego równania różniczkowego drugiego rzędu, stosując metodę ortogonalizacji Galerkina. Równanie to uwzględnia oba rozpatrywane przypadki obciążeń, przy założeniu dodatkowym dotyczącym obciążenia ciśnieniem zewnętrznym. Posiłkując się szczególnymi postaciami równania ruchu Doktorant przeprowadza analizę stateczności statycznej (wyznacza bifurkacyjne siły krytyczne), analizę modalną drgań własnych oraz analizuje statyczne i dynamiczne pokrytyczne ścieżki równowagi.

Wreszcie rozwiązuje przypadek obciążenia płyty ciśnieniem zewnętrznym, pomijając w ogólnym równaniu ruchu człon dynamiczny, człon nieliniowy oraz zerując obciążenia ściskające. To ostatnie rozwiązanie pozwala na analizę stanu naprężenia w funkcji współrzędnej prostopadłej do powierzchni środkowej płyty, szczególnie zbadanie efektu naprężeń tnących przy założonej hipotezie deformacji.

Podrozdział 2.2. zawiera szczegółowy opis i analizę porównawczą wyników obliczeń opartych na rozwiązaniu analitycznym i obliczeń numerycznych MES. Obliczenia numeryczne MES Autor przeprowadził w czterech wariantach: rozwiązanie zagadnienia o wartościach własnych (bifurkacyjne siły krytyczne i analiza modalna), analiza nieliniowa statycznych ścieżek pokrytycznych, analiza nieliniowa stateczności dynamicznej oraz analiza stanu naprężenia i odkształcenia w płycie poddanej ciśnieniu zewnętrznemu. W pierwszych trzech wariantach Doktorant zastosował elementy powłokowe, w ostatnim – elementy bryłowe. Obliczenia numeryczne przeprowadzono za pomocą kodu numerycznego Abaqus.

Wyniki porównawcze obliczeń przedstawione są w postaci bardzo szczegółowych tablic i wykresów.

Rozdział 3. poświęcony jest porównawczej analizie numerycznej zachowania się konstrukcji nadwozia wagonu osobowego poddanego tzw. nadzwyczajnemu obciążeniu. Analizie poddano konstrukcję klasyczną wykonaną z elementów stalowych oraz konstrukcję zmodyfikowaną, której niektóre elementy zastąpiono płytami trójwarstwowymi z aluminiowym rdzeniem oraz elementami z materiału FGM. Dokonano analizy odpowiedzi konstrukcji na obciążenia zarówno statyczne, jak i dynamiczne, w kilku wariantach (obciążenie pionowe, siła ściskająca), analiza modalna, symulacja „crashtestu”). Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci map naprężeń i deformacji oraz odpowiednich wykresów.

Rozdział 4. Zawiera podsumowanie wyników badań oraz wnioski końcowe. Autor dokonuje analizy porównawczej wyników obliczeń dla płyty prostokątnej z materiału FGM, opartych na rozwiązaniu analitycznym oraz wyników MES. Stwierdza, że otrzymane wyniki potwierdzają poprawność przyjętej hipotezy deformacji przekroju normalnego płyty, przy pewnych zastrzeżeniach, dotyczących rozkładów naprężeń stycznych. Doktorant podsumowuje też wyniki analizy strukturalnej nadwozia wagonu osobowego. Stawia wniosek, iż zastosowanie w niektórych elementach konstrukcji nadwozia wagonu materiałów gradientowych powoduje zwiększenie nośności konstrukcji przy jednoczesnej redukcji masy.

3. Ogólna ocena rozprawy

Doktorant podjął się rozwiązania istotnego, z punktu widzenia rozwoju mechaniki ciał odkształcalnych i jej zastosowań w inżynierii, zagadnienia stateczności zarówno statycznej, jak i dynamicznej płyty wykonanej z materiału gradientowego, przy założeniu gradientowego rozkładu własności mechanicznych materiału płyty wzdłuż jej grubości. Zagadnienie rozwiązał metodą analityczną, przyjmując autorską hipotezę deformacji prostej normalnej do powierzchni środkowej płyty. Przyjęcie tej hipotezy i rozwiązanie analityczne zagadnienia stanowi istotny, oryginalny wkład do rozwoju teorii stateczności, a ogólniej, teorii nośności cienkościennych elementów konstrukcyjnych wykonanych z materiałów gradientowych i jest w mojej opinii głównym elementem nowatorskim recenzowanej rozprawy. Na podkreślenie zasługuje fakt, że Doktorant podjął się rozwiązania analitycznego postawionego zagadnienia, co jest rzadkim przypadkiem w dobie fascynacji metodami numerycznymi. Podzielim tu pogląd Kandydata wyrażony w podsumowaniu, że cyt. *„modele analityczne wciąż stanowią fundament poznawczy dla zjawisk... zachodzących w rzeczywistych konstrukcjach”*. Ponadto, ze względu na możliwość uogólnień, we wszystkich przypadkach, w których możliwe jest rozwiązanie analityczne, należy go poszukiwać.

Rozwiązując analitycznie postawione zagadnienie, Doktorant wykazał się pogłębioną wiedzą w dziedzinie mechaniki ciała stałego i metod matematycznych mechaniki, w szczególności metod analitycznych i analityczno-numerycznych. Równoległe do rozwiązania analitycznego, w pracy przeprowadzono szeroko zakrojone i poprawnie zaplanowane symulacje numeryczne MES, zarówno dla przypadku wyizolowanej płyty prostokątnej, jak i konstrukcji nadwozia wagonu kolejowego. Kandydat wykazał się również w tej części pracy bardzo szeroką wiedzą z zakresu budowy modeli numerycznych MES i symulacji MES złożonych konstrukcji rzeczywistych poddanych obciążeniom złożonym zarówno statycznym, jak i dynamicznym. Oryginalnym elementem recenzowanej pracy są zatem także wyniki symulacji MES, które wykazały podwyższenie nośności przy jednoczesnej redukcji masy nadwozia wagonu, w którym zastosowano elementy wykonane z materiałów gradientowych.

Podsumowując powyższe, stwierdzam, że Doktorant udowodnił postawione w rozprawie tezy. Recenzowaną pracę oceniam bardzo wysoko. Mgr inż. Dawid Witkowski jest dobrze przygotowany do planowania i prowadzenia badań w dziedzinie szeroko pojętej mechaniki konstrukcji.

4. Uwagi krytyczne

1. Doboru współczynników β i k_s w założonej funkcji deformacji (25) i (30) dokonano przez minimalizację statycznego (bifurkacyjnego) obciążenia krytycznego płyty. Nie jest oczywiste, czy minimalizacja innych wielkości, np. ugięcia w_a (145) nie przyniosłaby innych wyników. Bardziej ogólną metodą byłaby minimalizacja energii odkształcenia sprężystego (64).

2. Brakuje szczegółowych komentarzy do bardzo obszernych wyników porównawczych na wykresach (rys. 27 – 43) w podrozdziale 2.2.. Komentarze takie zawarte są (dość skrótowo) w podsumowaniu (rozdz. 4.). Wprawdzie otrzymano bardzo dobrą zgodność wyników analitycznych i MES rozkładów naprężeń normalnych wzdłuż grubości płyty, jednakże bardziej szczegółowego komentarza w podrozdziale 2.2. wymaga szczególnie duża rozbieżność w wykresach naprężeń tnących τ_{xz} (rys. 41-43) otrzymanych z rozwiązania analitycznego i symulacji MES. Rozbieżność ta może wynikać z doboru funkcji deformacji.
3. W modelu MES płyty poddanej ciśnieniu p użyto elementów bryłowych. Generalnie, do modelowania struktur płytowych lub powłokowych nie stosuje się elementów bryłowych, ze względu na stosunek grubości elementu do jego pozostałych wymiarów, co zwiększa błąd interpolacji. Wprawdzie zastosowano elementy 20-węzłowe, w których błąd ten jest minimalizowany, jednak byłoby wskazane porównanie wyników obliczeń dla tego przypadku obciążenia (ciśnieniem p) przy zastosowaniu obu typów elementów.
4. Za przypadek referencyjny przyjęto płytę o współczynnikach rozkładu parametrów materiałowych $k_e = 0$ i $e_0 = 1$ (o największej sztywności, dla której siła krytyczna jest największa). Dla lepszego śledzenia korzyści, wynikających z zastosowania materiału gradientowego, byłoby wskazane przyjęcie płyty o najmniejszej sztywności, jako referencyjnej (np. dla $k_e = 0$ i $e_0 = 0.05$) lub przy przyjęciu płyty referencyjnej o współczynnikach $k_e = 0$ i $e_0 = 1$ wyznaczenie współczynników lekkości N_{kr} /masa płyty.
5. Opis modelu MES konstrukcji nadwozia wagonu jest zbyt zwięzły. Z opisu wynika, że zastosowano dwa modele. Nie jest jasne, jakie były modele konstytutywne materiałów dla poszczególnych wariantów obliczeń i jakie przyjęto kryteria uplastycznienia lub, ogólniej, zniszczenia dla tych wariantów. W szczególności nie jest jasne, jakie modele konstytutywne materiałów przyjęto do obliczeń odpowiedzi dynamicznej konstrukcji, m.in. czy model dla elementów stalowych uwzględniał wpływ prędkości płynięcia.
6. Praca byłaby bardziej kompletna, gdyby przeprowadzono badania doświadczalne wyizolowanych płyt z materiału gradientowego poddanych przynajmniej jednemu z przyjętych wariantów obciążenia. Walidacja rozwiązania analitycznego, szczególnie przyjętej funkcji deformacji, wyłącznie „eksperymentem numerycznym” MES nie jest w pełni wystarczająca. Tzw. „eksperyment numeryczny” nie może zastąpić eksperymentu na obiektach rzeczywistych. Zatem badania doświadczalne stanowiłyby uzupełnienie recenzowanej pracy.

5. Uwagi edytorskie

Opracowanie edytorskie pracy jest staranne. Rozprawa napisana jest poprawnym językiem, a jej układ jest przejrzysty. Dla lepszej przejrzystości wskazany byłby podział najdłuższego rozdziału drugiego na dwa lub trzy krótsze rozdziały dotyczące rozwiązania analitycznego, symulacji MES i analizy porównawczej wyników.

Na rys. 41-43 użyto nieco mylących oznaczeń naprężeń normalnych w funkcji osi z. Ogólnie przyjętą konwencją w teorii sprężystości jest oznaczanie wyłącznie stycznych składowych tensora naprężeń σ_{ij} przy $i \neq j$.

Na niektórych wykresach (rys. 27-30) użyto mało kontrastowych kolorów dla poszczególnych krzywych, co utrudnia śledzenie tych wykresów. Szczególnie dotyczy to wykresów na rys. 27 i 28.

Powyższe uwagi krytyczne nie umniejszają mojej bardzo wysokiej oceny pracy.

Wniosek końcowy

Dorobek publikacyjny Doktoranta obejmuje 2 publikacje (według bazy Scopus), w tym jeden artykuł w czasopiśmie indeksowanym JCR oraz 5 wewnętrznych opracowań niepublikowanych.

Biorąc pod uwagę wysoką ocenę rozprawy, przedstawioną powyżej, oraz dotychczasowy dorobek publikacyjny Doktoranta spełniający w stopniu dostatecznym wymagania ustawowe, stwierdzam, że **rozprawa doktorska mgr inż. Dawida Witkowskiego pt: „Stateczność płyty prostokątnej o symetrycznie zmiennych właściwościach mechanicznych poddanej obciążeniom dynamicznym”** 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.

Jednocześnie, zgodnie z wyrażoną wyżej wysoką oceną pracy, zawierającej elementy oryginalne, które stanowią istotny wkład Kandydata do rozwoju teorii stateczności i nośności konstrukcji cienkościennych wykonanych z materiałów gradientowych, a także biorąc pod uwagę aplikacyjne walory pracy, stawiam wniosek o jej wyróżnienie.

Łódź, 6. września 2022 r.

