



Dr hab. inż. Radosław J. Mania, prof. nadzw.

Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji

Politechnika Łódzka

90-924 Łódź, ul. B. Stefanowskiego 1/15, PL

tel: +48 (0-42) 636-22-21, sec. +48 (0-42) 631-22-14

e-mail: Radoslaw.Mania@p.lodz.pl

Łódź 03.01.2018 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Perlińskiego-Chaładaja

pt. „Stateczność jedno oraz dwukierunkowo wstępnie pofałdowanych sinusoidalnie ścianek kształtowników stalowych”

promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Bohdan Michalak

promotor pomocniczy dr inż. Michał Gajdzicki

Ocenę opracowano na zlecenie Prodziekana Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej dr hab. inż. Artura Zaguły, zgodnie z uchwałą Rady Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska PŁ - pismo z dnia 10.11.2017 r..

1. Omówienie pracy

Przedstawiona do mojej oceny rozprawa doktorska zatytułowana "*Stateczność jedno oraz dwukierunkowo wstępnie pofałdowanych sinusoidalnie ścianek kształtowników stalowych*" dotyczy problemu oceny nośności oraz stateczności kształtowników ze środkiem strukturalnym nadającym konstrukcji ortotropię właściwości wytrzymałościowych. Celem pracy jest weryfikacja istniejących modeli płyt pofałdowanych jednokierunkowo oraz rozszerzenie ich i/lub wprowadzenie modeli obliczeniowych dla płyt o dwukierunkowym pofałdowaniu sinusoidalnym. Jest to realizowane w oparciu o modele analityczne oraz modele numeryczne przygotowane w metodzie elementów skończonych. Praca bazuje na teorii płyt cienkich w ujęciu liniowym oraz nieliniowym geometrycznie i fizycznie w analizie MES. Jej celem głównym było opracowanie uproszczonego, inżynierskiego modelu zastępczego dla płyt o ortotropii konstrukcyjnej dla różnych parametrów geometrycznych ustroju oraz określenie zakresu aplikacji tego modelu w blachownicach spawanych. Wybór tematu należy uznać za ciekawy i mający istotne znaczenie praktyczne dla inżynierów i badaczy prowadzących obliczenia wytrzymałościowe stateczności i nośności konstrukcji cienkościennych.

Praca charakteryzuje się staranną narracją i umiejętnym prezentowaniem poszczególnych obszarów rozwiązywanego problemu. Doktorant po wprowadzeniu odnoszącym się do znanych rozwiązań z płytami pofalowanymi jako środkami dźwigarów stalowych, definiuje cel pracy oraz tezy pracy. Następnie przypomina podejścia modelowe praktykowane w dotychczasowej analizie teoretycznej i numerycznej cienkościennych konstrukcji płytowych, w szczególności w odniesieniu do analizy ich stateczności i nośności przy równomiernym ściskaniu, ścinaniu oraz płytowym zginaniu. W kolejnym etapie rozprawy dokonuje omówienia podejścia do analizy płyt o ortotropii konstrukcyjnej i sposobach wyznaczania zastępczych modułów sztywności płytowej dla różnych kształtów pofalowań i przetłoczeń. Analiza ta odnosi się dość szczegółowo do literatury przedmiotu i badań innych ośrodków naukowych i akademickich, stanowiąc jednocześnie wprowadzenie zależności analitycznych wykorzystanych w kolejnych częściach dysertacji. Wskazany fragment pracy zawiera bardzo liczne referencje literaturowe dające dobre odniesienie do stanu wiedzy i badań na świecie związanych z analizą ustrojów z ortotropią strukturalną. Ten fragment pracy będąc podłożem teoretycznym daje także odniesienie do omówienia zaproponowanych przez Doktoranta modyfikacji stosowanych modeli dla płyt z jednokierunkowym pofalowaniem oraz propozycji redukcji struktury z dwukierunkowym pofalowaniem do płyty ortotropowej o zastępczych sztywnościach płytowych. Poświęcony jest temu rozdział 3, gdzie to są szczegółowe skomentowane płyty z jednokierunkowym pofalowaniem sinusoidalnym, a w tabelach zestawione są wyniki obliczeń według wersji 'analitycznej' z obliczeniami numerycznymi. Natomiast w rozdziale 4 analogiczne rozważania prowadzone są dla płyt o dwukierunkowym pofalowaniu sinusoidalnym. Pracę kończy prezentacja kilku przykładów obliczeniowych, gdzie rozwiązania z MES uzyskane za pomocą komercyjnego pakietu Abaqus porównane są z wynikami uzyskanymi w oparciu o Eurokod 3 dla konstrukcji stalowych. Pracę kończy lista literatury zawierająca 65 pozycji poprzedzona wnioskami końcowymi i perspektywami dalszych badań naukowych Autora. Praca napisana jest na 207 stronach i podzielona jest na sześć rozdziałów numerowanych, plus spis literatury.

2. Oryginalność pracy

Przedstawiona do mojej oceny dysertacja stanowi autorskie opracowanie Doktoranta w zakresie badania wytrzymałości i oceny stateczności dźwigarów nośnych z elementami (środkami) o ortotropii konstrukcyjnej. Zawiera propozycję nowego - dotychczas nieistniejącego, oszacowania sztywności płyt o dwukierunkowym pofalowaniu sinusoidalnym wraz z modyfikacjami dla płyt pofalowanych jednokierunkowo. Jest to

konsekwentnie zrealizowany cel pracy, a sposób wprowadzenia analitycznych formuł dla tych ustrojów konstrukcyjnych jest poparty solidną analizą porównawczą i wnikliwą analizą literaturową oraz bardzo obfitymi (!) obliczeniami numerycznymi. Uzyskane wyniki teoretyczne i numeryczne są oryginalnym wkładem Autora w rozwój analizy konstrukcji cienkościennych.

Należy podkreślić zastosowaną metodę analizy porównawczej z licznymi odniesieniami do literatury, w oparciu o którą Autor weryfikował swoje podejście analityczne i wytrzymałościowe. Szeroki zakres tych referencji z jednej strony odzwierciedla różnorodność stosowanych w praktyce obliczeniowej wariantów redukcji elementów strukturalnych do płyt o zastępczych właściwościach sztywności płytowych, a z drugiej stanowi potwierdzenie zastosowanego przez Autora podejścia interpretacyjnego. Świadczy to o dobrym warsztacie naukowym mgr inż. Wojciecha Perlińskiego-Chaładaja.

Ciekawym elementem pracy jest rozdział 6, w którym zawarto kilka przykładów obliczeniowych, świadomie dobranych przez Doktoranta dla wykazania skuteczności wprowadzonego sformułowania w testach porównawczych względem normy krajowej i europejskiej. Uzyskana zgodność wyników potwierdza prawidłowość zaproponowanych metod upraszczania konstrukcji płyt strukturalnych do płyt płaskich.

Praca ma charakter teoretyczny niemniej zaprezentowane przez Doktoranta wyniki są wartościowe zarówno w zakresie naukowym jak i praktycznym.

3. Uwagi krytyczne i spostrzeżenia

Obok pozytywnej oceny strony merytorycznej pracy wyrażonej wyżej, na pozytywną notę zasługuje także ogólna szata graficzna pracy. Praca napisana jest dobrym językiem, w przejrzysty i logiczny sposób prowadzi czytelnika przez kolejne wywody, co sprawia, że dobrze się ją czyta.

Muszę także zwrócić uwagę na pewne zapisy i niejasności w pracy, o których wyjaśnienie proszę jej Autora. Niektóre wymieniam poniżej:

- Autor lubi trzymać się pewnych sformułowań, które są dyskusyjne. Np. wielokrotnie powtarza się, że „...odebrano stopień swobody tak, aby zachować geometryczną niezmiennność układu.”, a na stronie 167 pojawia się dodatkowo „kinematyczna niezmiennność układu” (?). Mam wrażenie, że oceniane deformacje konstrukcji pod wpływem zadanego obciążenia zewnętrznego prowadzą do zmian w geometrii analizowanej konstrukcji. Podejrzewam, że cel takiego postępowania/formułowania był inny, ale to mieści się w wyrażonej prośbie o wyjaśnienia.
- W spisie literatury tylko początkowe 40 pozycji + [46] znajduje odniesienia w tekście. Dodatkowo nie znalazłem w referencjach literaturowych prac autorstwa Doktoranta.

Wydaje się to niewłaściwe wobec podjęcia ciekawego, o praktycznym znaczeniu tematu pracy doktorskiej. Choć w dodatkowej informacji przekazanej przez Pana Dziekana widnieją dwie publikacje współautorskie i trzy wystąpienia konferencyjne inż. Perlińskiego-Chaładaja.

- W pracy Autor podkreśla analizę konstrukcji w zakresie liniowo-sprężystym (np. str. 111). Na potrzeby rozdziału 6 wprowadzono materiał sprężysty - idealnie plastyczny. Jednakże z pobieżnej analizy tabel z wartościami sił krytycznych dla szeregu przypadków wynika, że naprężenia towarzyszące tym siłom są większe od granicy plastyczności dla wielu stali konstrukcyjnych (w szczególności od $R_e = 355$ MPa). To jednak nie znajduje komentarza w tekście pracy.
- Konstrukcje cienkościenne, jak wiadomo, są wrażliwe na wstępne imperfekcje kształtu. Autor o nich wspomina, ale ich wpływu nie analizuje i nie komentuje. Nie wiemy zatem, czy w badanych konstrukcjach o strukturze pofałdowanej są one istotne czy też inżynier w ocenie konstrukcji może je pominąć.
- Czy był oceniany wpływ naprężeń resztkowych na obciążenia krytyczne, co dla blach z przetłoczeniami/pofałdowaniami wydaje się być istotne?
- Czy wyrażenia na siły krytyczne w rozdziale 2 zostały wyprowadzone przez Doktoranta, czy są cytowane z prac innych autorów. Nie jest to zaznaczone w pracy.
- Tytuł Tablicy 2-6 mówi o sile krytycznej, a zależności podane mają wymiar naprężeń. Zręczniejszy byłoby operować np. pojęciem 'obciążenie'.
- Warunki brzegowe stosowane w obliczeniach MES budzą zastrzeżenia:
 - Tablica 3-2 - sprzężenie przemieszczeń δx blokuje efekt Poissona, a trzy rotacje nie są konieczne przy podparciu krawędzi prostoliniowej.
 - str. 67 - czy na pewno warunki brzegowe w rozdziale 3.3.3 są identyczne jak w rozdziale 3.3.2. Sprzężenie przemieszczeń δy daje efekt utwierdzenia, gdyż węzły fali leżą w pasie o szerokości dwóch amplitud w jednej płaszczyźnie. Czy nie lepiej byłoby zrealizować sprzężenie węzłów o współrzędnej $z = 0$, które nie blokuje rotacji.
 - Tabela 3-14 - ciekawą formę warunków brzegowych dla czystego ścinania podali: J. Loughlan, N. Hussain, The in-plane shear failure of transversely stiffened thin plates, Thin-Walled Structures, 81, 2014, pp. 225-235.
 - Tabela 4-4 - sprzężenia rotacji - jak w punkcie pierwszym, a dodatkowo analitycznie tych rotacji nie definiujemy.
- Tabela 3-16 - Czy mowa jest o średniej arytmetycznej czy też sumie geometrycznej przemieszczeń u_x i u_y węzła C, bo dla całej krawędzi byłoby to o połowę mniej.
- Str. 27, Rys. 2-17 - podpis jest na stronie następnej.
- Str. 87, Wnioski - w drugim wierszu jest mowa o tym, że: 'współczynnik k_h zależy od grubości płyty', by wiersz niżej przeczytać, że: 'wpływ grubości płyty jest pomijalnie mały'. Które ze stwierdzeń jest zatem prawdziwe?

- W tabelach 3-32÷3-34 podana jest jednostka siły krytycznej [kN/m.b.] by w późniejszych legendach było jedynie [kN/m].
- Str. 115 - jak rozumieć '...w zakresie 5-10 komórek wzdłuż jednego boku elementu.' powtórzone także później. Czy chodzi tu o element skończony czy element konstrukcji/płyty?
- Str. 33 - jak należy rozumieć pojęcie 'idealne warunki brzegowe' zastosowane w analizie tam opisanej?
- str. 145 - '...założona postać wyboczenia to jedna półfala opisana wzorem 4-16'. Jak można w analizie stateczności liniowej MES założyć postać wyboczenia? To jest wynik wyznaczenia postaci własnej macierzy sztywności. Możemy zadać imperfekcję o określonej postaci, ale w analizie nieliniowej.
- str. 146 - '...powierzchnia wyboczenia jest zupełnie nienaturalna...'. A może taka jest po prostu najniższa postać własna, a postaci 'naturalne', czyli odpowiadające wersji analitycznej są wyżej? Podobnie jak na Rys. 4-45 gdzie postaci wyższe byłyby podobne do przyjętych w analizie teoretycznej. Stąd w tablicach z wartościami sił krytycznych, gdyby poszukano wyższych postaci ale zgodnych z analitycznymi, rozbieżności byłyby mniejsze, a zakres 'stosowalności' zaproponowanego modelu szerszy (str. 177). Dodatkowo wniosek na stronie 168, że 'otrzymane postaci wyboczenia mogą sugerować błędnie dobrane warunki brzegowe' w świetle powyższego jest zbyt rygorystyczny. Potwierdzają to wyniki analizy z Tabeli 4-28. Należy na to spojrzeć, jako na niezgodności postaci wyboczenia pomiędzy obydwoma zastosowanymi przez Autora podejściami, albo w analizie nieliniowej jako efekt sprzężenia postaci wyboczenia.
- Str. 181 w.-5 - w przypadku płyty podpartej na obwodzie przyjmuje się, że wyboczenie ma charakter lokalny. O wyboczeniu globalnym, typu eulerowskiego możemy mówić w przypadku płyty o dwóch nieobciążonych krawędziach swobodnych.
- Dlaczego Autor przyjął model materiału jak na Rys. 5-3, a nie model sprężysto-plastyczny ze wzmocnieniem?
- Czy w przykładach w Rozdziale 6 sterowano siłą?
- W podrozdziale 5.3 przyjęte odmienne warunki brzegowe od tych w rozdziale 5.2, które były bliższe utwierdzeniu krawędzi.
- Porównanie Tablic 5-3 i 5-7 pokazuje, że o nośności badanych profili decyduje stateczność. Nie jest to komentowane.

Badane profile dwuteowe o średniku strukturalnym są często w konstrukcjach elementem pracującym na zginanie. Wprawdzie w pracy analizowano przypadek nierównomiernego ściskania, w szczególności płytowego zginania, ale wydaje się ciekawym aby w planach badawczych Autora zginanie dźwigarów z elementami pofałdowanymi znalazło miejsce.

4. Wniosek końcowy

Recenzowana praca zawiera wartościowe wyniki badań teoretycznych i numerycznych będąc oryginalnym osiągnięciem naukowym Autora. Zastosowane podejście analityczne i numeryczne pozwoliło na zbadanie wpływu sposobów upraszczania płyt strukturalnych do modelu płaskiego ortotropowego co pozwala na łatwiejszą w praktyce inżynierskiej analizę stateczności konstrukcji tego typu. Uzyskane wyniki pozwoliły na weryfikację przyjętego modelu analitycznego i zapewne spowodują częstszą aplikację w praktyce dźwigarów ze ściankami pofałdowanymi. Doktorant samodzielnie rozwiązał problem naukowy - trafnie dobrany, o aktualnym znaczeniu, co potwierdza Jego dużą wiedzę z zakresu mechaniki i budownictwa.

Biorąc zatem pod uwagę całość pracy stwierdzam, że mgr inż. Wojciech Perliński-Chaładaj spełnia wymogi Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym z dn.14.03.2003 roku (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zm.) stawiane rozprawom doktorskim w dziedzinie BUDOWNICTWO. **Na tej podstawie stawiam wniosek o przyjęcie i dopuszczenie pracy mgr inż. Wojciecha Perlińskiego-Chaładaja do publicznej obrony.**

