



Prof. dr hab. inż. Radosław J. Mania
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 15.07.2020 r.

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

Ocenę opracowano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej dr hab. inż. Piotra Budzyńskiego, prof. uczelni - pismo z dnia 26 maja 2020 r..

1. Omówienie pracy

Przedstawiona do mojej oceny rozprawa doktorska zatytułowana "Analiza pokrytycznych ścieżek równowagi ściskanej kompozytowej płyty z wycięciem o zadanych ugięciach wstępnych" zawiera ocenę stateczności oraz nośności cienkiej płyty z centralnym otworem wykonanej z materiału kompozytowego typu CFRP poddanej jednokierunkowemu ściskaniu. Celem prowadzonej przez Autorkę analizy numerycznej i badań eksperymentalnych było uzyskanie sekwencji warstw płyty pozwalającej na 'stabilną pracę' tejże płyty w zakresie pokrytycznym według wyższej, giętko-skrętnej postaci wyboczenia. Przy czym pojęcie 'stabilnej pracy' jest tu użyte w kontekście zachowania postaci wyboczenia w stanie pokrytycznym. Efekt ten został osiągnięty w wyniku 'zmiany parametrów geometrycznych centralnego wycięcia oraz odpowiedni dobór układu warstw kompozytu z wykorzystaniem sprzężeń mechanicznych, przy zachowaniu stałych parametrów geometrycznych i masy ustroju,' co było zawarte w tezie naukowej pracy. Płytowy element o tego typu właściwościach przewidziany jest do zastosowania jako element sprężysty lub nośny.

Osiągnięcie postawionego celu było realizowane najpierw w analizie numerycznej na modelu opracowanym w pakiecie ABAQUS, bazującym na metodzie elementów skończonych, z zastosowaniem podejścia płytowego w ujęciu nieliniowym. Następnie, wybrane rozwiązanie

struktury laminatu spełniającego postawione warunki pracy w zakresie pokrytym poddano badaniom laboratoryjnym. W ocenie nośności warstwowej płyty z centralnym wycięciem zastosowano kryterium Tsai-Wu dostępne w programie ABAQUS dla materiałów ortotropowych.

Doktorantka napisała, iż *'...W ostatnich latach zagadnienia dotyczące mechaniki i zniszczenia kompozytów należą do głównych zagadnień z obszaru nauk podstawowych, wymagających zastosowania interdyscyplinarnych metod badawczych. Problem ten należy do istotnych zagadnień w projektowaniu konstrukcji cienkościennych, jednakże mechanizmy powodujące zniszczenie struktury kompozytowej są jeszcze słabo poznane. Powstaje tutaj szereg pytań, na które wielu badaczy poszukiwało i nadal poszukuje odpowiedzi'*. Jest to nad wyraz słuszna uwaga, która determinuje cel recenzowanej dysertacji. Tematyka oceny pracy konstrukcji warstwowych ma duże znaczenie praktyczne wobec stale rosnącego zastosowania materiałów warstwowych w konstrukcjach różnego typu oraz w różnych obszarach inżynierii, zarówno w kontekście bezpieczeństwa jak i trwałości tych konstrukcji.

Praca napisana jest na 108 stronach i podzielona jest na osiem rozdziałów numerowanych, które poprzedza wykaz oznaczeń. Po rozdziałach zamieszczony jest spis literatury oraz dwa jednostronicowe streszczenia w języku polskim i angielskim.

Po wprowadzeniu do tematu i problematyki rozprawy w rozdziale 1, Doktorantka dokonuje przeglądu literatury odnosząc się do 285 publikacji. Publikacje własne w liczbie 10-ciu, w których Doktorantka jest pierwszym współautorem, zebrane są w odrębnym zestawieniu i nie ujęte w spisie ogólnym. Wnioski z przeglądu literatury, podzielonego na trzy obszary tematyczne: stateczność cienkich płyt, mechanika płyt warstwowych i stateczność (płyt) w ujęciu MES, były dobrym odniesieniem do sformułowania tezy pracy doktorskiej, celu oraz jej zakresu. Można już w tym miejscu podkreślić, że cel ten w postaci opracowania struktury laminatu oraz efektywnego modelu numerycznego dobrze skorelowanego z eksperymentem został osiągnięty.

W kolejnym fragmencie rozprawy o 'właściwościach mechanicznych laminatów' Autorka omawia podstawy teoretyczne analizy cienkich płyt warstwowych. Definicje tu zawarte pozwalają w kolejnym rozdziale na sformułowanie przedmiotu badań oraz wskazanie 'narzędzia', czyli sposobu modyfikowania macierzy sztywności laminatu dla uzyskania sekwencji warstw składowych dającej oczekiwany efekt deformacyjny.

Dobór tej/tych sekwencji warstw jest omówiony w rozdziale 4 w odniesieniu do układu symetrycznego, od którego rozpoczęto badania laminatu z wycięciem, by następnie w części drugiej skupić się na strukturach niesymetrycznych proponowanych w pracach Yorka. Choć tu dyskusyjne wydaje się podejście, w którym *'ze sprzężeniami E-B i T-B'* wybrano *'(zewnątrzne warstwy płyty) oraz E-T (rdzeń płyty)'*. Macierze sztywności ABD są wyliczane bowiem dla całej grubości płyty, dla wszystkich jej warstw, a wtedy efekty obecne dla płyty o mniejszej liczbie i sekwencji warstw mogą nie występować lub występować w innym stopniu przy większej liczbie warstw.

W rozdziale 5 znajdujemy omówienie analiz numerycznych w odniesieniu do stanu krytycznego i pokrytycznego, po którym następuje opis stworzonego modelu MES badanej płyty warstwowej z centralnym wycięciem. Geometria tej płyty uwarunkowana celem zastosowania jej jako elementu sprężystego, jest rozważana w pięciu wariantach wymiaru otworu oraz dwóch i trzech wariantach sekwencji warstw - odpowiednio symetrycznej i niesymetrycznej. Gabaryt płyty pozostaje niezmienny. Łącznie zbadano kilkanaście próbek po trzy dla danego wariantu warstw i geometrii otworu, co uczyniło program badawczy dość obszernym. Dla wyznaczenia obciążenia krytycznego zastosowano metodę optycznej korelacji obrazu z wykorzystaniem systemu ARAMIS do analizy ugięcia płyty, w połączeniu z rejestracją przebiegu siły ściskającej. Rejestrowane parametry pozwoliły na zapisanie ścieżek równowagi badanej płyty w układzie siła-ugięcie, a na ich podstawie określenie obciążeń krytycznych. Natomiast nośność określono jedynie w analizie numerycznej w oparciu o kryterium Tsai-Wu. Wyniki badań eksperymentalnych są opracowane w formie tabel z wartościami obciążeń krytycznych oraz obciążeń niszczących, a także licznych wykresów z przebiegiem ugięć.

Rozdział 7 zawiera omówienie wyników badanych konstrukcji cienkościennych oraz ich porównanie w kontekście obydwu stosowanych metod - numerycznej i eksperymentalnej, a także obydwu wariantów sekwencji warstw - symetrycznej i niesymetrycznej. Należy podkreślić dobrą zgodność uzyskanych wyników obydwoma metodami, co potwierdza efektywność opracowanego modelu numerycznego cienkiej płyty kompozytowej z centralnym wycięciem.

W ostatnim rozdziale 8 znajduje się pięciopunktowe podsumowanie podzielone na komentarz zastosowanej metodyki badań, pracy płyty z wycięciem w wersji symetrycznej oraz w wersji z niesymetrycznym układem warstw. Tym ostatnim poświęcono więcej miejsca, gdyż ten model płyty był bezpośrednią realizacją celu pracy. W liście literatury znajdują się także jedna praca współautorska Doktorantki nie wymieniona w spisie prac własnych.

2. Oryginalność pracy

Przedstawiona do mojej oceny praca doktorska stanowi autorskie opracowanie Doktorantki w zakresie badania wytrzymałości, stanu krytycznego i oceny nośności cienkich płyt z otworem wykonanych w materiałach kompozytowych. Opracowanie to obejmuje: obliczenia numeryczne na bazie przygotowanego modelu numerycznego MES płyty, pozwalające na analizę jej pracy w pełnym zakresie obciążenia; badania laboratoryjne kilkunastu próbek o różnej geometrii i sekwencji warstw oraz wyznaczenie właściwości mechanicznych zastosowanego do wytworzenia próbek kompozytu typu CFRP - kompozytu polimerowego wzmocnianego włóknami węglowymi. Ten ostatni element pracy jest dość lakonicznie potraktowany w dysertacji. Poprawność i efektywność modelu MES została zweryfikowana i potwierdzona w badaniach doświadczalnych (liczne zestawienia podobnych obrazów deformacji wyznaczonych w MES i zaobserwowanych w eksperymencie) przeprowadzonych na pełnowymiarowych płytach kompozytowych wykonanych techniką autoklawową. Jest to konsekwentnie zrealizowany cel pracy, poparty analizą porównawczą i sprawnym stosowaniem narzędzi MES

oferowanych w pakiecie Abaqus. Potwierdzenie umiejętności prowadzenia badań doświadczalnych z zastosowaniem nowych technik pomiarowych (metoda korelacji optycznej) i klasycznych - w badaniach podstawowych materiału kompozytowego. Uzyskane wyniki eksperymentalne i numeryczne są oryginalnym wkładem Autorki w rozwój analizy wytrzymałości cienkościennych konstrukcji kompozytowych.

Zastosowana metoda analizy porównawczej z odniesieniami do prac innych autorów pozwoliła na weryfikację własnego podejścia w tworzeniu modelu MES oraz w prowadzeniu badań laboratoryjnych, a także potwierdziła dobry warsztat naukowy mgr inż. Katarzyny Falkowicz.

Praca ma charakter analityczno-badawczy, ale zaprezentowane przez Doktorantkę wyniki mają znaczenie w zakresie zarówno naukowym jak i praktycznym.

3. Uwagi krytyczne i spostrzeżenia

Obok pozytywnej oceny strony merytorycznej pracy przedstawionej powyżej, na pozytywną notę zasługuje także szata graficzna pracy. Układ pracy wynika z zamysłu Autorki co do porządku prezentowania kolejnych jej obszarów. Jednakże omawianie wyników kilka rozdziałów dalej niż omawiany problem i jego rozwiązanie, powoduje pewne trudności w odbiorze. Język w niektórych fragmentach jest niespójny i niejednorodny, co może wynikać z licznych odniesień do literatury angielskojęzycznej i związanych z tym tłumaczeń.

Muszę także zwrócić uwagę na pewne zapisy i niejasności w pracy, o których wyjaśnienie w ramach naukowej dyskusji proszę jej Autorkę. Dla przykładu zwrócę uwagę na:

- drobne literówki w tekście pracy mogące wynikać 'z pomocy' edytora tekstu;
- str. 12 - '*...[121] przeprowadzili analizę wybocheniową podpartej w prosty sposób prostokątnej...*' zapewne chodzi o przegubowe podparcie krawędzi płyty.
- W przeglądzie literatury Autorka kilkakrotnie odwołuje się do podstawowych monografii lub publikacji przeglądowych w kontekście zbadania lub zaproponowania określonego nowego rozwiązania lub podejścia. Wydaje się, że nie jest to prawidłowa forma analizy literatury, gdyż publikacje tego typu są formą wtórną, podsumowującą określone podejście teoretyczne wcześniej opublikowane. Można je przytoczyć właśnie w takim kontekście.
- Str. 19 - słowo '*crack*' w mechanice pęknięcia w literaturze polskojęzycznej funkcjonuje jako 'szczelina, pęknięcie'.
- Str. 22 - jak należy rozumieć stwierdzenie, że '*większość elementów cienkościennych badana była w zakresie wytrzymałościowym.*'?
- Str. 25 - '*przyjmuje się małe przemieszczenia w płaszczyźnie płyty, które nie zależą od płaszczyzny z*' - zapewne kierunku z'
- Str. 26, równania (3.1) i (3.2) - brak przecinków w oznaczeniach pochodnych cząstkowych,
- Str. 26 ostatnie wiersze - odwołanie do głównych osi ortotropii bez referencji do rysunku, obecnego na kolejnej stronie.

- Str. 35 - co wpłynęło na dobór sekwencji warstw w laminacie symetrycznym badanym w pierwszym wariancie płyty z wycięciem?
- Str. 37 równania (4.1) - w symetrycznym laminacie także elementy A_{16} i A_{26} oraz D_{16} i D_{26} są zerowe – skoro inne zerowe są zapisane explicite.
- Str. 38 - w niekompletny sposób opisano oznaczenia zaczerpnięte z prac Yorcka. Oznaczenia te nie są powszechnie stosowane, stąd wykorzystanie ich w niniejszej pracy winno być opisane w odniesieniu do wszystkich indeksów specyfikujących macierze sztywności laminatu.
- Str. 39 - '*...niesymetrycznych układach warstw wybrano klasy laminatu ze sprzężeniami E-B i T-B (zewnątrzne warstwy płyty) oraz E-T (rdzeń płyty).*' - wspominałem o tym wcześniej, iż sprzężenia mechaniczne w płycie warstwowej definiowane w macierzach ABD odnoszą się do kompletnej grubości płyty, a nie jej fragmentu czy grupy warstw.
- Str. 40 - '*Obliczenia prowadzono dla 3 różnych wartości kątów ułożenia włókien laminatu: 30°, 45° oraz 60°*' - czemu analogicznych kątów laminacji nie wybrano w strukturach symetrycznych rozważanych pierwotnie. Dodatkowo wybrano inny materiał dla płyt o niesymetrycznej sekwencji warstw niż w przypadku płyt o symetrycznym ułożeniu warstw.
- Str. 47 - '*Właściwości materiału kompozytowego opisano definiując model materiału ortotropowego w płaskim stanie naprężenia*' - czy na pewno? Czy program Abaqus nie wymagał podania parametrów materiału ortotropowego w 3 kierunkach dla elementów płytowych 3D?
- Rys. 5.7 - jaki efekt miało odebranie rotacji R_z węzłom z obciążonych krawędzi płyty, które miały zablokowane przemieszczenia w kierunku osi y ? Co z przemieszczeniem U_x tych węzłów?
- Czy postać giętno-skrętna była najniższą postacią wyboczeniową płyty niesymetrycznej? Czemu prowadzono analizę nieliniową przy stosunkowo wysokiej amplitudzie imperfekcji wstępnych (0,1w)? Czy w przypadku płyty o niesymetrycznej sekwencji potrzebna była imperfekcja do wymuszenia ugięcia?
- Str. 58 i dalej - '*nastąpił spadek wartości siły krytycznej na poziomie 42% dla układu PSI*' - nie jest jasne do jakich wartości odnoszą się podane spadki.
- Str. 59 - czy wymuszenia pasów bocznych były jednakowe co wartości (bezwzględnej) w przeciwnych kierunkach (\pm).
- W tabelach z wynikami należało konsekwentnie zachować jednakową liczbę cyfr po przecinku - np. Tabela 7.2.
- Str. 68 - '*...konfiguracja PN1 składa się z 18 warstw kompozytu, natomiast konfiguracja PN3 z 12 warstw*' - czemu przyjęto różną liczbę warstw kompozytu przy analizie porównawczej prowadzonej pod kątem wpływu otworu na nośność płyty z wycięciem? W pracy nie ma wyników podanych w formie bezwymiarowej, co mogłoby tę różnicę 'zneutralizować'.
- Czym można wytłumaczyć oscylacje ugięć widoczne w stanie pokrytym dla niektórych konfiguracji warstw? W jakich punktach płyty te ugięcia były mierzone?

- Na rys. 7.30 i kolejnych, ścieżka równowagi dla płyty PN2_45_20x100 jest relatywnie krótka wobec przebiegów dla innych wariantów. Czym to można wyjaśnić?
- Z jakich powodów wybrano kryterium Tsai-Wu, a nie inne kryteria zniszczenia pozwalające na rozróżnienie źródła inicjacji zniszczenia kompozytu - włókno, matryca itd. Mapy współczynnika zniszczenia (FF) wg Tsai-Wu pokazują wysokie wartości tego współczynnika na zaokrągleniach wycięcia. Czy sprawdzono zatem wpływ promienia na koncentrację naprężeń w laminacie? Czy w eksperymencie obserwowano na krawędzi wycięcia w sąsiedztwie miejsca o wysokim współczynniku zniszczenia delaminację?
- Str. 91 - *'...również zmniejszenie sztywności pokrytycznych ścieżek równowagi o 48% dla PN1_45 i PN2_45 oraz o 38% dla PN3_45'* Co Autorka rozumie przez zmniejszenie sztywności ścieżek równowagi?

Pragnę zauważyć, że powyższe uwagi dyskusyjne nie umniejszają wartości osiągniętych w pracy doktorskiej rezultatów. Zakładam ponadto, że Doktorantka będzie kontynuowała tematykę badawczą podjętą w dysertacji bądź w oparciu o jej wyniki przygotuje kolejną publikację. Stąd mam nadzieję, że moje pytania i uwagi mogą być w tym użyteczne.

4. Wniosek końcowy

Recenzowana praca zawiera interesujące wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych będąc oryginalnym osiągnięciem naukowym Autorki. Zastosowane narzędzia badawcze pozwoliły na zbadanie wpływu struktury warstwowej płyty z wycięciem na jej wytrzymałość, stateczność i nośność. Weryfikacja opracowanego modelu MES w odniesieniu do wyników badań laboratoryjnych, dowiodła jego aplikacyjności dla oceny analogicznych konstrukcji warstwowych. Doktorantka samodzielnie rozwiązała problem naukowy - trafnie dobrany, o aktualnym znaczeniu, osiągając główny cel rozprawy doktorskiej. Godnym podkreślenia jest fakt współautorstwa mgr inż. Falkowicz w 11 publikacjach naukowych (10+1), a z kolejnych danych bibliometrycznych - liczby cytowań - 214, przy indeksie Hirscha 7 według bazy Scopus i odpowiednio 8 wg Web of Science.

Biorąc zatem pod uwagę całość pracy stwierdzam, że mgr inż. Katarzyna Falkowicz 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 dyscyplinie MECHANIKA (obecnie inżynieria mechaniczna). **Na tej podstawie stawiam wniosek o przyjęcie i dopuszczenie pracy mgr inż. Katarzyny Falkowicz do publicznej obrony.**

