

Michał Jan Guminiak, dr hab. inż., prof. PP
Instytut Analizy Konstrukcji
Politechniki Poznańskiej
ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań
tel. 61 665 24 75
e-mail: michal.guminiak@put.poznan.pl

Poznań, 2.01.2024 r.

Recenzja dysertacji doktorskiej pt.

Odkształcenia i wytrzymałość kompozytowych płyt wykorzystywanych do budowy kanałów wentylacyjnych

autorstwa mgr. inż. Krzysztofa Keglera przygotowanej pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Marcina Kamińskiego oraz dr. hab. inż. Roberta Cichowicza, prof. PŁ

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzja dysertacji doktorskiej zatytułowanej *Odkształcenia i wytrzymałość kompozytowych płyt wykorzystywanych do budowy kanałów wentylacyjnych*, której autorem jest mgr inż. Krzysztof Kegler, została opracowana na podstawie pisma z dnia 30 listopada 2023 roku, wystosowanego przez Przewodniczącego Rady do spraw Stopni Naukowych w dyscyplinach Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, Architektura i Urbanistyka Politechniki Łódzkiej prof. dr. hab. inż. Dariusza Gawina, zgodnie z Uchwałą Rady ds. Stopni Naukowych Politechniki Łódzkiej w dyscyplinach Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, Architektura i Urbanistyka z dnia 28 listopada 2023 roku. Promotorami dysertacji doktorskiej są prof. dr hab. inż. Marcin Kamiński oraz dr hab. inż. Robert Cichowicz, prof. Politechniki Łódzkiej.

2. Opis dysertacji

Dysertacja przygotowana w języku polskim liczy 137 stron. Składa się ze streszczenia w językach polskim i angielskim wraz ze słowami kluczowymi, sześciu rozdziałów, które zawierają wstęp, założenia i cel pracy, opis eksperymentu laboratoryjnego oraz numerycznego, wnioski, bibliografię i załączniki do treści dysertacji.

Podstawowym celem postawionym przez Doktoranta jest określenie przyczyn niskiej wytrzymałości płyt kompozytowych, które mają zastosowanie w budowie kanałów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych, oraz opracowanie metod wzmocnienia struktury tych płyt.



Rozważania naukowe Doktoranta skoncentrowane zostały na poznaniu zasad montażu kanałów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych z płyt kompozytowych, aktualnie stosowanych metod badań wytrzymałościowych wspomnianych kanałów, analizie aktualnego stanu wiedzy w zakresie materiałów kompozytowych, opracowaniu autorskiego programu badawczego umożliwiającego przygotowanie programu badań eksperymentalnych płyt kompozytowych, przeprowadzeniu badań doświadczalnych płyt na autorskim stanowisku badawczym, wykonaniu numerycznych badań wytrzymałościowych płyt kompozytowych, analizie porównawczej wyników otrzymanych doświadczalnie i numerycznie, zaproponowaniu metody wzmocnienia płyt wielowarstwowych stosowanych w budowie kanałów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych, symulacji numerycznej mechaniki płyt ze wzmocnieniami wraz z uwzględnieniem różnych wariantów wzmocnień oraz na wielokryterialnej analizie wyników symulacji numerycznej w celu znalezienia rozwiązania optymalnego.

3. Uwagi krytyczne o dysertacji

3.1. Uwagi formalne

Przedstawiona dysertacja ma budowę klasyczną, jest napisana w sposób staranny i składa się z sześciu rozdziałów, bibliografii i trzech załączników.

Rozdział pierwszy zawiera wprowadzenie w analizowaną tematykę, przedstawiono w nim motywację do podjęcia działań naukowych na tym polu, cel i zakres dysertacji, przegląd literatury poświęconej podjętej tematyce badawczej, główne tezy niniejszej dysertacji oraz związany z nimi autorski program badań.

Rozdział drugi poświęcony jest opisowi zastosowania płyt wielowarstwowych w budowie instalacji wentylacyjnych i klimatyzacyjnych, przedstawieniu metod wykonywania kompozytowych kanałów wentylacyjnych, badaniom właściwości mechanicznych kanałów wentylacyjnych oraz przedstawieniu materiałów kompozytowych mających zastosowanie w wykonawstwie kanałów wentylacyjnych, w tym ich właściwościami fizycznymi.

Rozdział trzeci zawiera opis badań doświadczalnych nad płytami kompozytowymi (bez wzmocnień), autorskiego stanowiska badawczego oraz uzyskanych wyników.

W rozdziale czwartym umieszczono opis eksperymentu numerycznego w ujęciu metody elementów skończonych (MES) z podaniem wyboru programu obliczeniowego, właściwego typu elementu skończonego oraz wyniki obliczeń dla równych wariantów wzmocnień konstrukcji.

Rozdział piąty poświęcony jest opisowi wzmocnienia struktury płyt kompozytowych, który zawiera badania eksperymentalne płyt ze wzmocnieniami, wyniki badań eksperymentalnych płyt ze wzmocnieniami, w tym badań płyt ze wzmocnieniami poprzecznymi S512 i M514, ze wzmocnieniami podłużnymi oraz ze wzmocnieniami matą z włókien węglowych. W rozdziale tym Autor przedstawił również odpowiednie modele numeryczne takich płyt oraz wykonał analizę optymalnego wyboru wzmocnienia.

Rozdział szósty zawiera podsumowanie wykonanych badań, wnioski, bibliografię, spis tabel i rysunków oraz trzy załączniki i zamyka całość dysertacji.

3.2. Uwagi merytoryczne

Doktorant podjął ciekawy temat dociekań naukowych związany z projektowaniem kanałów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych, który poświęcony jest określeniu przyczyn niskiej wytrzymałości płyt kompozytowych stanowiących elementy konstrukcyjne. Podstawowymi tezami niniejszej dysertacji są następujące stwierdzenia, cyt.:

1) *Za wytrzymałość płyt kompozytowych wykorzystywanych do budowy kanałów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych odpowiedzialna jest wytrzymałość zewnętrznych warstw kompozytu.*

2) *Wytrzymałość płyt kompozytowych można zwiększyć, stosując wzmocnienia tylko jednej z warstw kompozytu.*

Aby udowodnić powyższe dwa stwierdzenia, Doktorant opracował plan badań, który umieścił w formie graficznej na stronie 11.

Na początku rozdziału drugiego Autor dysertacji objaśnił pojęcia instalacji wentylacyjnej i klimatyzacyjnej oraz zasady projektowania tychże instalacji z punktu widzenia właściwej wymiany powietrza w pomieszczeniu. Następnie Doktorant wskazał materiały służące do budowy kanałów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych. W dalszym ciągu rozważań Doktorant przeszedł do opisu badań właściwości mechanicznych kanałów wentylacyjnych. Doktorant stwierdza, że cyt. *badania kanałów kompozytowych, jeśli już pojawiają się w literaturze, to przeważnie koncentrują się na kompozytach bez rdzenia z wełny mineralnej lub pianki PUR/PIR (...) albo dotyczą właściwości izolacyjnych lub akustycznych*". Doktorant stwierdził, że cyt.: *(...) główną pozycją literaturową w zakresie badań wytrzymałościowych jest aktualna norma PN-EN 13403:2005 „Wentylacja budynków. Przewody niemetalowe. Sieć przewodów wykonanych z płyt izolacyjnych”* oraz że powyższa norma wymaga sprecyzowania opisu obciążenia, jakiemu poddane są kanały wentylacyjne. W normie podano bowiem wyłącznie wartość ciśnienia oddziaływania ośrodka (gazu) na ścianki kanału, cyt. *W rozdziale normy dotyczącej odporności na ciśnienie kanałów zbudowanych z płyt wielowarstwowych podano tylko, że powinny one wytrzymywać 2,5-krotną wartość nadciśnienia nominalnego deklarowanego przez producenta, lecz nie mniej niż 200 Pa. Nie podano w niej, przez jaki czas kanał wentylacyjny ma wytrzymać to ciśnienie. Nie podano również, czy powinno ono być stałe w czasie badania, czy też powinno narastać, a jeśli tak, to przez jaki czas.* Doktorant zauważył, że w eksploatacji bardzo ważna jest dynamika pracy konstrukcji kanału przy uruchamianiu i wyłączaniu instalacji, gdzie wystąpią wówczas gwałtowne zmiany ciśnienia.

Następna część rozdziału drugiego poświęcona jest opisowi materiałów kompozytowych stosowanych do budowy wyżej wymienionych kanałów (kompozyty zbrojone: cząstkami, dyspersyjnie i włóknami). Kanały kompozytowe, które zostały poddane analizie, to wielowarstwowe płyty izolacyjne składające się z trzech warstw: folii aluminiowej wzmocnionej włóknem szklanym, wełny mineralnej

spojonej żywicą termoutwardzalną i tkaniny szklanej jako wykończenia wewnętrznej powierzchni kanału. Autor dysertacji przedstawia metody wykonywania kanałów kompozytowych, a następnie przechodzi do opisu mechaniki i praw fizycznych analizowanych materiałów stanowiących składowe elementy kompozytu. Dość dużo miejsca Doktorant poświęca na szczegółowy opis praw fizycznych materiału (tkaniny) o cechach ortotropowych dla płaskiego stanu naprężenia. Recenzent zauważa, że zdanie ze strony 28 dysertacji, cyt. *Przyjmuje się, że macierze C i S są symetryczne*, wymaga sprecyzowania. Opis mechaniki kompozytów o strukturze ortotropowej jest znany, ale w kontekście niniejszej dysertacji dobrze, że Autor zawarł go w części opisowej (teoretycznej).

Kolejny ważny element dysertacji stanowią badania doświadczalne, które Autor zawarł w rozdziale trzecim. Doktorant przeprowadził badania wytrzymałościowe poszczególnych składowych kompozytu wielowarstwowego w zakresie zachowania się warstw zewnętrznych, tzn. folii aluminiowej i tkaniny szklanej w teście jednoosiowego rozciągania oraz warstwy rdzenia wykonanego z wełny mineralnej dla ściskania, rozciągania oraz ścinania. Eksperymenty doświadczalne dotyczyły badania warstwy zewnętrznej wykonanej z folii aluminiowej i tkaniny szklanej dla jednoosiowego rozciągania oraz badania rdzenia wykonanego z wełny mineralnej w teście na ściskanie, rozciąganie i ścinanie. Doktorant przeprowadził badania wytrzymałościowe na rozciąganie w Laboratorium Badawczym Katedry Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych Politechniki Łódzkiej na urządzeniu INSTRON 3384. Zbadanych zostało pięć próbek tkaniny zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1:2012. Sposób wycinania próbek na frezarce CNC (ang. *computerized numerical control*) Doktorant przedstawił na rysunku 20, a otrzymane wyniki w postaci wartości wytrzymałości na jednokierunkowe rozciąganie dla dwóch prostopadłych do siebie kierunków zamieścił w tabelicy 1. Następnie Doktorant określił moduł sprężystości podłużnej (Younga). W dalszej kolejności Doktorant przeprowadził badania rdzenia płyty, a wyniki w postaci określenia zależności między naprężeniem normalnym i odpowiadającym mu odkształceniem dla trzech niezależnych, wzajemnie prostopadłych do siebie kierunków zamieścił w postaci wykresów na rysunku 27 oraz w tabelicy 2, w której podał również wytrzymałości na ściskanie. Na uwagę zasługują wyniki zależności naprężenie–odkształcenie uzyskane dla kierunków drugiego i trzeciego, gdzie można wyraźnie zaobserwować sprężysto-plastyczne zachowanie materiału. Wyniki uzyskane w teście na rozciąganie Doktorant przedstawił na rysunku 29 i w tabelicy 3. W odniesieniu do próby ściskania wełny mineralnej w kierunku równoległym można wyróżnić punkt zerwania jej włókien, co wywołane jest delaminacją warstw wełny.

Badania doświadczalne wieńczy test prostego ścinania. Otrzymane wyniki Doktorant przedstawił na rysunku 32 w formie wykresów, a otrzymane wartości liczbowe wytrzymałości na ścinanie i modułu odkształcenia postaciowego (Kirchhoffa) zamieścił w tabelicy 4. Wyniki badań eksperymentalnych zostały wykorzystane przez Doktoranta przy budowie modelu numerycznego przedstawionego w rozdziale czwartym niniejszej dysertacji. Rozdział trzeci zamyka opis eksperymentalnych badań płyt kompozytowych. Doktorant zaprojektował stanowisko badawcze tak, aby można było wykonać badania płyt obciążonych równomiernie ciśnieniem na całej powierzchni. Szczegóły konstrukcji Doktorant

przedstawił na rysunkach 35 i 36. Wyniki tych badań wskazują, że płyty deformują się w sposób liniowo-sprężysty do wartości obciążenia zewnętrznego (nadciśnienia) równej około 450 N/m^2 . Po przekroczeniu tej wartości nastąpiło złamanie płyty wzdłuż linii największego wycięcia jej przekroju poprzecznego. Doktorant przedstawił uzyskane wyniki na rysunkach 39–43 w formie wykresów opisujących relację ugięcie–obciążenie (ciśnienie) dla każdego z punktów pomiarowych. Doktorant sformułował również następujące wnioski, cyt.: *W przypadku badanego kompozytu, z warstwami o diametralnie różnych właściwościach mechanicznych, wyboczenie warstwy z tkaniny szklanej następuje w kierunku materiału znacznie bardziej podatnego, którym jest wełna mineralna. Z tego powodu, jak również ze względu na kierunek obciążenia wywołującego ściskanie po stronie wewnętrznej kanału, wszystkie miejsca, w których następowała lokalna utrata stateczności, charakteryzowały się kierunkiem wyboczenia do rdzenia kompozytu (rys. 44). Przekroczenie wartości naprężeń krytycznych przy ścisłaniu powoduje nagłą utratę sztywności warstwy i w konsekwencji zmniejsza sztywność całego kompozytu. Dalsze zachowanie układu jest kwestią sztywności kolejnej warstwy z wełny mineralnej. W zależności od tego, utrata sztywności może następować w sposób mniej lub bardziej gwałtowny” oraz „Na podstawie analizy uszkodzenia badanych płyt oraz jej poszczególnych warstw (rys. 44) wyciągnięto wniosek, że czynnikiem odpowiadającym za utratę sztywności płyty przy oddziaływującym na nią ciśnieniu o wartości powyżej 450 Pa , jest wytrzymałość warstwy ściskanej, tj. tkaniny z włókna szklanego. Przy obciążeniu ściskającym, działającym wzdłuż kierunku włókien, zniszczenie kompozytu jest związane z efektem wyboczenia się włókien w płaszczyźnie warstwy kompozytowej (rys. 45).*

W rozdziale czwartym Doktorant opisał zaproponowany model numeryczny płyty kompozytowej. Na początku rozdziału Doktorant przedstawił ogólne założenia konieczne do zdefiniowania wybranego modelu numerycznego konstrukcji. Rozważania te mają charakter wprowadzenia do zastosowania metod numerycznych ze szczególnym uwzględnieniem metody elementów skończonych. Doktorant wymienia jeszcze metodę różnic skończonych (MRS) w odniesieniu do samego sposobu rozwiązania układu równań różniczkowych cząstkowych. Równania takie można rozwiązywać także przy zastosowaniu metody elementów skończonych (MES), a w wybranych przypadkach rozwiązanie zadania można przedstawić w postaci tzw. reprezentacji całkowitej i przy zastosowaniu metody elementów brzegowych (MEB), jeśli znane jest tzw. rozwiązanie podstawowe lub zbiór rozwiązań podstawowych, o czym Doktorant nie wspomina. Istnieją jeszcze inne metody/podejścia, np. metoda pasm skończonych, metoda Trefftza, o czym Doktorant również nie wspomina.

Doktorant przeprowadził analizy numeryczne przy zastosowaniu komercyjnego programu komputerowego metody elementów skończonych ANSYS. Doktorant odwzorował strukturę warstwowej płyty kompozytowej, która składa się z trzech warstw, tzn. folii aluminiowej wzmocnionej włóknem szklanym, wełny mineralnej i tkaniny z włókna szklanego, przy czym wszystkie warstwy cechują się innymi własnościami materiałowymi. Materiały składowe płyty kompozytowej wykazują cechy ortotropowe, co Doktorant uwzględnił w modelu numerycznym, a własności materiałowe zestawiał w tabelicy 5.

W dalszym ciągu rozważań, w rozdziale piątym, Doktorant przedstawił propozycje wzmocnień wymienionych wcześniej płyt kompozytowych. Na początku rozdziału Doktorant prezentuje standardowe rozwiązania stosowane jako wzmocnienia płyt za pomocą profili ze stali ocynkowanej o różnych przekrojach – w kształcie litery U i T. Rozwiązania te pokazane są na rysunku 64. Następnie Doktorant rozważa inne materiały, które mogą znaleźć zastosowanie w konstrukcjach wzmacniających – kompozyty o zbrojeniu wykonanym z włókien (ang. *fiber reinforced polymers* – FRP). Zbrojenie tych kompozytów wykonane jest z włókien niemetalicznych o wysokiej wytrzymałości otoczonych matrycą z żywicy epoksydowej. Kompozyty te wykazują cechy anizotropowe i mają, jak podaje Doktorant, następujące oznaczenia: CFRP (ang. *carbon fibre reinforced polymers*) – materiały na bazie włókien węglowych, GFRP (ang. *glass fibre reinforced polymers*) – materiały na bazie włókien szklanych oraz AFRP (ang. *aramid fibre reinforced polymers*) – materiały na bazie włókien aramidowych. Jak twierdzi Doktorant, cyt.: *Ideą biernego wzmocnienia jest pasywne wbudowanie (naklejanie lub wklejanie) kompozytu FRP (taśm bądź mat) w niedozbrojone bądź nadmiernie odkształcone strefy elementu. Współpraca pomiędzy tak wzmocnionym elementem i kompozytem rozpoczyna się w momencie przyrostu odkształceń, np. w wyniku przyłożenia dodatkowych odkształceń użytkowych. Efektem biernego wzmocnienia zginanego elementu jest poprawa warunków stanu granicznego nośności. Dodatkowo wystąpi pewne zwiększenie sztywności przekroju. Zaletą biernego wzmocnienia jest nieskomplikowana i prosta technologia aplikacji, niewymagająca uciążliwych prac przygotowawczych, a także specjalistycznego sprzętu, dlatego koszt wykonania takiego wzmocnienia jest relatywnie niski.* Przykłady zastosowania taśm CFRP Doktorant zaprezentował na rysunku 65.

Następnie Doktorant przeszedł do właściwego opisu autorskich badań eksperymentalnych dla różnych wariantów ułożenia taśm wzmacniających: wariant 1 – taśmy CFRP ułożone wzdłuż krótszego boku płyty (poprzecznie) i dwóch różnych wytrzymałościach taśm (taśmy typu S512 i M514), wariant 2 – taśmy CFRP ułożone wzdłuż dłuższego boku płyty oraz wariant 3 – maty CFRP naklejone na całą powierzchnię płyty. Do przeprowadzenia powyższych badań Doktorant wykorzystał zbudowane wcześniej autorskie stanowisko badawcze, na którym przeprowadził badania płyt identycznych pod względem typu i gabarytów jak analizowane przy wcześniejszych eksperymentach laboratoryjnych dotyczących płyt niewzmocnionych. Dla każdej serii badań eksperymentalnych Doktorant analizował dwie płyty. Wyniki powyższych badań eksperymentalnych w postaci zależności między ugięciem mierzonym w punkcie obserwacji a ciśnieniem działającym na powierzchnię płyty Doktorant przedstawił na rysunkach 69–88. Ostatnią część rozważań Doktoranta w tym zakresie stanowi opracowanie odpowiedniego modelu numerycznego płyt ze wzmocnieniami. Dane materiałowe przyjęte do budowy modelu Doktorant zawarł w tabelicy 14. Autor niniejszej dysertacji dość mało miejsca poświęcił na całościowe przybliżenie modelu zgodnie z założeniami metody elementów skończonych. Zdaniem recenzenta warto w tym miejscu bardziej szczegółowo opisać rodzaj elementu skończonego (Doktorant podaje: element bryłowy), liczbę węzłów oraz liczbę stopni swobody stowarzyszonych z węzłem elementu, nawet jeśli wydaje się, że są to charakterystyki typowe, które czytelnik dysertacji

powinien znać. Doktorant mógłby rozszerzyć model o wprowadzenie np. zjawiska kontaktu między płytą a taśmami. Opis taki sprawiłby, że przygotowana dysertacja miałaby pełniejszy charakter z punktu widzenia mechaniki. Uwaga powyższa może zostać wykorzystana przez Doktoranta w dalszej pracy naukowej.

Wyniki otrzymane na drodze analiz numerycznych wykazują dobrą zgodność z wynikami badań doświadczalnych, co ilustrują rysunki 92–96. Kolejny element rozdziału piątego stanowi zadanie optymalizacji wzmocnień tak, aby powierzchnia wzmocnień była jak najmniejsza. Zadanie wyboru optymalnego rozwiązania Doktorant przedstawił w postaci analizy wariantowej. W tym miejscu nasuwa się pytanie o propozycje bardziej zaawansowanych metod optymalizacyjnych (literatura: R.T. Haftka, Z. Gürdal, *Elements of structural optimization*, Springer, 2012).

W ostatnim, szóstym rozdziale dysertacji Doktorant sformułował trzy wnioski, które brzmią, cyt.:
Wniosek 1: Czynnikiem odpowiadającym za wytrzymałość badanej płyty kompozytowej i dopuszczalny zakres ciśnienia pracy, jest wytrzymałość zewnętrznej warstwy ściskanej w wyniku obciążenia płyty ciśnieniem. Wniosek 2: Zastosowanie wzmocnień w postaci taśm z włókien węglowych pozwoliło na zmniejszenie naprężeń na warstwie zewnętrznej płyty, efektywnie zwiększając zakres dopuszczalnego ciśnienia jakim można obciążyć płytę oraz zmniejszając ugięcia. Wniosek 3: Ilość (liczbę – rec.) wzmocnień można zmniejszyć przy jednoczesnym zachowaniu przyjętego poziomu niezawodności, wykorzystując wyniki symulacji zachowania płyt wzmocnionych taśmami z włókien szklanych, wykonywanych w programie ANSYS. Możliwa stała się ocena wielokryterialna efektywności wzmocnień, dzięki czemu wskazano najbardziej optymalne warianty. Za główną konkluzję niniejszej dysertacji można uznać wniosek pierwszy.

Niniejsza dysertacja przygotowana jest w sposób czytelny i rzetelny. Jeśli jednak Doktorant rozważałby wydanie dysertacji w formie monografii, warto zwrócić uwagę na aspekt ściśle językowy, tzn. zamiast „ilość węzłów” powinno być „liczba węzłów” itd.

Na zakończenie Doktorant przedstawił propozycje dalszych badań, tzn. zastąpienie taśm CFRP taśmami wykonanymi z innych materiałów (Doktorant nie precyzuje jakich), zmianę sposobu łączenia wzmocnień z taśm węglowych z powierzchnią płyt oraz badania płyt kompozytowych z rdzeniem wykonanym z piany poliuretanowej (PUR i PIR) w odniesieniu do płyt z rdzeniem z wełny mineralnej o różnej grubości.

W przeglądzie literatury związanym z szeroko pojętą analizą płyt kompozytowych zabrakło dwóch pozycji wartych ujęcia w spisie pozycji bibliograficznych. Są to prace Z. Pozorskiego (Z. Pozorski, *Sandwich panels in civil engineering – theory, testing and design*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Politechnika Poznańska, 2016 r.) oraz R. Studzińskiego i Z. Pozorskiego (R. Studziński, Z. Pozorski, *Experimental and numerical analysis of sandwich panels with hybrid core*. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 20(3), 271–286, 2018). Powyższe pozycje zawierają szczegółowy opis mechaniki płyt warstwowych i stanowiłyby dobre uzupełnienie spisu pozycji literaturowych zaproponowanych przez Doktoranta. Dysertację zamyka spis literatury oraz trzy załączniki.

3.3. Główne elementy oryginalne przedstawione w dysertacji

W niniejszej dysertacji można wyróżnić następujące główne oryginalne elementy zaproponowane przez Autora:

- Główne tezy dysertacji związane z kryteriami wytrzymałościowymi płyt kompozytowych.
- Wykonanie autorskich badań laboratoryjnych materiałów tworzących płytę kompozytową – tzn. materiałów, z których wykonana jest warstwa zewnętrzna oraz rdzeń płyty. Na uwagę zasługuje staranne przygotowanie stanowiska laboratoryjnego.
- Zaproponowanie modelu numerycznego płyty kompozytowej w ujęciu metody elementów skończonych i przeprowadzenie obliczeń w zakresie liniowym oraz w zakresie nieliniowym, uwzględniającym zniszczenie kolejnych warstw laminatu.
- Wykonanie autorskich badań laboratoryjnych płyt kompozytowych ze wzmocnieniami.
- Zaproponowanie modelu numerycznego płyty kompozytowej ze wzmocnieniami w ujęciu metody elementów skończonych.
- Wnioski końcowe związane z określeniem kryteriów wytrzymałościowych badanych płyt kompozytowych.

3.4. Uwagi, sugestie i pytania

Opis mechaniki płyt kompozytowych można uznać za satysfakcjonujący, choć miejscami wymagałby uszczegółowienia, np. Doktorant mógłby wspomnieć, że stosuje tzw. zapis Voigta (zapis zwężony) przy określaniu w ujęciu macierzowym relacji między wielkościami (obiektami) tensorowymi. Opis tworzenia układu równań metody elementów skończonych został przedstawiony w sposób czytelny i ma charakter poglądowy i został przygotowany przy wykorzystaniu znanych pozycji literaturowych autorstwa O.C. Zienkiewicza, R.L. Taylora oraz J.Z. Zhu, cytowanych przez Doktoranta. Doktorant mógłby taki opis przygotować całkowicie autorsko i ukierunkować go na ujęcie zadania w ramach elementów skończonych stosowanych w dysertacji. Dużo miejsca Doktorant poświęcił opisowi metody najmniejszych kwadratów (metody najmniejszej sumy kwadratów [błędów]) w celu określenia wzoru na empiryczną zależność określającą przybliżoną wartość dopuszczalnego maksymalnego ciśnienia działającego na powierzchnię płyty kompozytowej w funkcji jej szerokości.

Często w oznaczeniach zmiennych brakuje konsekwencji, np. na stronie 57 wektor (macierz kolumnową) przemieszczeń Doktorant oznacza zwykłą literą „ u ”, a na stronie 58 macierz sztywności oznaczona jest wielką literą „ K ”, choć w literaturze związanej z rachunkiem macierzowym i ogólnie pojętymi metodami numerycznymi macierze oznaczane są następująco: \mathbf{K} , $[K]$, $[K_{ij}]$ itd. Te elementy można uznać za drobne niedociągnięcia, warto jednak w przyszłych publikacjach, np. o charakterze monograficznym, uwzględnić uwagi recenzenta.

Na zakończenie warto zwrócić uwagę na kilka elementów oraz poprosić Autora niniejszej dysertacji o odniesienie się do nich.

1. Szersze nakreślenie przesłanek, jakimi kierował się Autor przy wyborze niniejszego tematu dociekań naukowych.
2. Metoda elementów skończonych wydaje się jedynym narzędziem umożliwiającym w miarę szybką analizę mechaniki złożonych konstrukcji kompozytowych. Czy Autor rozważał zastosowanie innych metod numerycznych, np. metody różnic skończonych lub metody elementów brzegowych? Te dwie metody mogłyby stanowić alternatywę po wykorzystaniu teorii homogenizacji i rozwiązaniu równania różniczkowego rzędu szóstego opisującego płytę średniej grubości. Prosiłbym o komentarz.
3. Czy między warstwami płyty Autor zdefiniował zjawisko kontaktu?
4. Dlaczego zjawisko kontaktu zostało pominięte przez Autora w modelu numerycznym płyty ze wzmocnieniami?
5. Konstrukcjom powłokowym, również takim, których jeden z wymiarów geometrycznych jest dominujący (np. rura cienkościenna), często towarzyszy zjawisko globalnej i lokalnej utraty stateczności. Czy Autor mógłby krótko odnieść się do wpływu tego zjawiska w rzeczywistych konstrukcjach kanałów wentylacyjnych lub klimatyzacyjnych?
6. Jak zachowują się materiały analizowane przez Autora przy dużych zmianach temperatury i wilgoci? Czy Autor rozważał analizę w ramach sprzężonych pól termo-mechanicznych lub higro-termo-mechanicznych?
7. Jaka, zdaniem Autora, jest minimalna liczba elementów skończonych, np. bryłowych o ośmiu węzłach i trzech stopniach swobody w każdym z nich, przy której rozwiązanie metody elementów skończonych staje się miarodajne, np. otrzymane wyniki są bliskie ich odpowiednikom uzyskanym na drodze laboratoryjnej?
8. Warto zadać pytanie, w jaki sposób zastosowanie elementów skończonych wyższego rzędu, np. bryłowych o dwudziestu węzłach i trzech stopniach swobody w każdym węzle, wpłynie na dokładność rozwiązania i pozwoli zredukować całkowitą liczbę elementów skończonych.
9. Czy Autor rozważał zastosowanie innych niż bryłowe elementów skończonych – czy pozwalał na to komercyjny kod ANSYS?
10. Czy Autor rozważał zjawisko nagłego zwiększenia ciśnienia działającego na ściany kanału i badał, jak konstrukcja reaguje na takie zjawisko?
11. Nagły wzrost ciśnienia może mieć charakter dynamiczny, tzn. w bilansie sił działających w wybranej chwili czasu należy uwzględnić siły bezwładności. Czy takie sformułowanie zadania, zdaniem Autora, znacząco wpłynęłoby na wyniki obliczeń?
12. Czy można, zdaniem Autora, zaproponować prosty, jednowymiarowy model konstrukcji kanału wentylacyjnego, który ma odniesienie do teorii opisującej deformację pręta prostego?
13. Jaką metodę optymalizacji można, zdaniem Autora, zastosować przy określeniu niezbędnej liczby taśm na powierzchni płyty oraz długości wzmocnień wykonanych z taśm?



14. W ramach przeprowadzanych badań można również uwzględnić wpływ błędów (imperfekcji) materiałowych i montażowych na określenie warunków wytrzymałościowych konstrukcji kanałów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych. Prosiłbym Autora o krótki komentarz.
15. Jakie inne materiały można, zdaniem Autora, zaproponować do wykonania elementów konstrukcyjnych kanałów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych?
16. Czy transport masy powietrza ma znaczący wpływ na charakterystyki dynamiczne (częstości kołowe drgań własnych) oraz na charakterystyki akustyczne konstrukcji?

4. Wnioski końcowe i podsumowanie

Tematyka naukowa podjęta przez mgr. inż. Krzysztofa Keglera jest interesująca i może stanowić fundament do dalszych, bardziej zaawansowanych rozważań naukowych. Doktorant jest współautorem trzech publikacji o zasięgu krajowym, które wymienił w bibliografii zawartej w dysertacji, oraz współautorem jednego opatentowanego wynalazku (nr P.433174). Doktorant wykonał rzetelną pracę badawczą, której rezultaty przedstawił w niniejszej dysertacji.

Zdaniem recenzenta, mimo braku publikacji o zasięgu międzynarodowym, aktywność publikacyjna Doktoranta jest wystarczająca, aby ubiegać się o stopień naukowy doktora. Warto jednak poszerzyć ten obszar aktywności naukowej, tym bardziej że tematyka podjęta w dysertacji daje taką możliwość.

Stwierdzam również, że cel niniejszej dysertacji został przez jej Autora w pełni osiągnięty, a sformułowane tezy udowodnione oraz że wkład Autora niniejszej dysertacji w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport w obszarze mechaniki można uznać za widoczny.

Uwagi krytyczne i pytania zawarte w niniejszej opinii mają charakter dociekań naukowych i nie obniżają rzeczywistej wartości naukowej przedstawionej dysertacji.

GLÓWNY WNIOSEK KOŃCOWY

Przedstawione w dysertacji zagadnienia w pełni wyczerpują wszystkie kryteria stanowiące podstawę do ubiegania się przez mgr. inż. Krzysztofa Keglera o stopień naukowy doktora nauk technicznych w myśl Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. z 2018 r., poz. 1668 z późn. zm.).

Wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Łódzkiej o przyjęcie niniejszej dysertacji doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

