

Recenzja

rozprawy doktorskiej **mgr inż. Krzysztofa Keglera**

pt.: **„Odkształcenia i wytrzymałość kompozytowych płyt wykorzystywanych do budowy kanałów wentylacyjnych”**

**Promotorzy: dr hab. inż. Robert Cichowicz, prof. PŁ
prof. dr hab. inż. Marcin Kamiński**

1. Podstawa opracowania recenzji.

Recenzję opracowano na zlecenie 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 ww. dyscyplinach z dnia 28 listopada 2023 roku.

2. Krótka charakterystyka pracy.

Praca pt. **„Odkształcenia i wytrzymałość kompozytowych płyt wykorzystywanych do budowy kanałów wentylacyjnych”** obejmuje 137 stron wraz z rysunkami i tablicami oraz streszczeniami. Tekst podzielono na sześć rozdziałów, trzy załączniki i bibliografię zawierającą 117 pozycji literatury, w większości anglojęzycznej (61), w tym 3 pozycje Doktoranta (2 samodzielne i 1 współautorska). W bibliografii ujęto 101 artykułów, książek i podręczników oraz 16 norm, wytycznych, rozporządzeń i materiałów katalogowych.

Jednym z warunków rozwoju współczesnego świata jest ciągle dążenie do zmniejszenia zużycia energii w różnych procesach. Dotyczy to również procesów służących do utrzymania komfortu klimatycznego w budynku. W budynku traktowanym jako całościowo powiązany system energetyczny o nadrzędnym celu, jakim jest ograniczenie zużycia energii przy zachowaniu satysfakcjonującej jakości powietrza, decyduje całokształt zastosowanych rozwiązań projektowych: budynek, a więc rozwiązania materiałowo-konstrukcyjne jego przegród i szczelność powietrzna budynku oraz techniczne wyposażenie budynku, w tym zastosowane instalacje i ich rozwiązania materiałowo-konstrukcyjne m.in. kanałów wentylacyjnych.

Cechą charakteryzującą kanały wentylacyjne staje się również spełnienie podwyższonych wymagań izolacyjności cieplnej i akustycznej, a to rodzi pytanie o rozwiązania łatwe w wykonaniu i spełniające wymagania konstrukcyjne.

Wybór przez Doktoranta tematu kompozytowych płyt wykorzystywanych do budowy kanałów wentylacyjnych, ich wytrzymałości i odkształceń jest aktualny i potrzebny.

Celem użytkowym pracy, według Doktoranta, było określenie przyczyn niskiej wytrzymałości płyt kompozytowych stosowanych do budowy kanałów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych oraz opracowanie metod wzmocnienia ich struktury.

W analizach wykorzystano dwie metody, a mianowicie: badania eksperymentalne na dedykowanym stanowisku doświadczalnym oraz analizy numeryczne metodą elementów skończonych z zastosowaniem profesjonalnego oprogramowania ANSYS.

Praca stanowi logicznie uporządkowaną i przejrzystą całość.

W pracy można wyróżnić trzy części: wstępną przeglądową, podstawową badawczą oraz podsumowującą.

W części wstępnej i przeglądowej pracy (**rozdziały 1 i 2** – 17 stron) naświetlono umiejscowienie tematu pracy w zakresie mechaniki i wytrzymałości materiałów na potrzeby dyscypliny: inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do pracy oraz uzasadnienie wyboru poruszanej tematyki. Wykonany przegląd literatury pokazuje przedmiot badań, czyli płyty kompozytowe pod kątem zastosowania do konstrukcji kanałów wentylacyjnych. Naświetlono aktualny stan wiedzy w zakresie materiałów kompozytowych w budownictwie na tle jego historycznego rozwoju. Podrozdział ten ma charakter encyklopedyczny.

Przeгляд literatury objął również stosowane w tym zakresie wzmocnienia konstrukcyjne.

Patriotyzm lokalny pozwala mi zauważyć, że w przeglądzie literatury zabrakło prac autorów z Politechniki Poznańskiej: Zbigniewa Pozorskiego i Roberta Studzińskiego (rozprawa: Pozorski Z.: Sandwich panels in civil engineering – theory, testing and design. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Politechnika Poznańska, 2016 r, oraz artykuł: Studziński R., Pozorski Z.: Experimental and numerical analysis of sandwich panels with hybrid core. Journal of Sandwich Structures and Materials, 20(3), 271–286, 2018).

W rozdziale **1** wyznaczono cele badawcze, sformułowano tezy rozprawy oraz zaprezentowano program badań.

Rozdział 2 poświęcono instalacjom wentylacyjnym i klimatyzacyjnym, zamieszczając w nim oprócz zadań i podstawowej klasyfikacji wentylacji, porównanie materiałów stosowanych w budowie kanałów wentylacyjnych.

Porównano rozwiązania tradycyjne czyli przewody metalowe z innymi rozwiązaniami, w tym zwłaszcza, z zastosowaniem kompozytów wielowarstwowych.

Zaprezentowano dwa rodzaje płyt kompaktowych z rdzeniem z wełny mineralnej lub pianki PUR/PIR, spośród których za przedmiot badań w dysertacji, przyjęto wielowarstwowe płyty kompozytowe składające się z trzech warstw: folii aluminiowej, wzmocnionej włóknem szklanym, wełny mineralnej, spojonej żywicą termoutwardzalną i tkaniny szklanej, jako wykończenia wewnętrznej powierzchni kanału.

W następnym podrozdziale przedstawiono metody wykonywania kanałów kompozytowych uwypuklając możliwość wykonywania wszystkich czynności związanych z prefabrykacją i montażem na placu budowy i szybkość dostosowania montowanej instalacji do zmian projektowych.

W podrozdziale **2.3.** omówiono normę dotyczącą wentylacyjnych przewodów niemetalowych, która przewiduje dla sieci przewodów wykonanych z płyt izolacyjnych przeprowadzenie szeregu badań m.in. sprawdzenie wytrzymałości kanałów oraz ich dopuszczalnych odkształceń. Autor zauważył, że stopień szczegółowości normy jest mały i może prowadzić do błędnej oceny końcowej wytrzymałości przewodów.

Podrozdziały **2.4.** i **2.5.** zawierają podstawową klasyfikację i ogólną charakterystykę materiałów kompozytowych stosowanych w wykonawstwie kanałów wentylacyjnych, a także opis właściwości fizycznych analizowanych materiałów anizotropowych, w tym izotropowych i ortotropowych. Prezentuje opis mechaniki i praw fizycznych materiałów stanowiących części składowe kompozytu.

Dalsza część pracy stanowi podstawowy segment badawczy i zawiera kolejne trzy rozdziały (**3 – 5**).

W rozdziale 3 (20 stron) przedstawiono badania doświadczalne wykonane przez Doktoranta obejmujące badania materiałowe elementów składowych kompozytu oraz badania płyty kompozytowej jako całości.

Zakres badań doświadczalnych elementów składowych płyt kompozytowych traktowanych jako wzajemnie niezależne objął:

- badanie folii aluminiowej i tkaniny szklanej w teście jednoosiowego rozciągania,
- badanie warstwy rdzenia (wełny mineralnej) dla ściskania, rozciągania oraz ścinania..

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.

Przeprowadzając badania rdzenia płyty z wełny mineralnej Autor uwzględnił różne kierunki działania obciążenia ściskającego w stosunku do włókien.

Drugą część rozdziału poświęcono omówieniu nowego, eksperymentalnego stanowiska do badań płyt kompozytowych. Wykazano, że badania wytrzymałościowe kanałów wentylacyjnych niemetalowych jako całości może być obarczone błędami wynikającymi z ich sposobu formowania oraz konstrukcji i rozmieszczenia podpór.

Stanowisko doświadczalne zostało dedykowane na potrzeby badań odkształceń pod wpływem ciśnienia wewnętrznego pojedynczych płyt kompozytowych.

Analiza uzyskanych wyników badań doświadczalnych pozwoliła na wstępne określenie przyczyn uszkodzeń badanej płyty kompozytowej i skłoniła Doktoranta do dalszych badań umożliwiających ich weryfikację poprzez obliczenia symulacyjne stwarzające szersze możliwości badawcze np. dla innych wymiarów geometrycznych lub różnych materiałów składowych płyty wielowarstwowej.

W **rozdziale 4** (21 stron) zaprezentowano model numeryczny płyty kompozytowej. Spośród metod dyskretyzacji wybrano Metodę Elementów Skończonych (MES), a spośród narzędzi obliczeniowych mechaniki wybrano profesjonalne oprogramowanie **ANSYS**, a ściślej jego moduł o pełnej nazwie **ANSYS Composite Pre-Post (ACP)** stosowany w modelowaniu kompozytów warstwowych.

W modelu numerycznym odwzorowano warunki brzegowe własnego stanowiska doświadczalnego do badań płyt kompozytowych oraz wykorzystano dane materiałowe uzyskane z badań wytrzymałościowych składowych części płyty wielowarstwowej (zaprezentowane w rozdziale 3).

Opracowany model numeryczny umożliwił przeprowadzenie obliczeń dla większej liczby przypadków. Wariantowano:

- wymiary płyt w zakresie występujących w praktyce inżynierskiej szerokości kanałów kompozytowych (minimum do maksimum),
- ciśnienia wewnętrzne.

W podpunkcie 4.4. porównano wyniki badań doświadczalnych i analiz numerycznych i stwierdzono dobrą zgodność w zakresie odkształceń liniowych, natomiast gorszą po przekroczeniu wartości naprężeń niszczących warstwę tkaniny szklanej.

W podpunkcie 4.5. wyznaczono, na podstawie analizy ugięć rozważanych wariantów płyt bez wzmocnień w punkcie środkowym w funkcji nadciśnienia, zależność określającą przybliżoną wartość dopuszczalnego maksymalnego ciśnienia. Do aproksymacji zależności wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów.

W rozdziale 5 (23 strony) przedstawiono propozycje wzmocnienia struktury płyt kompozytowych. We wstępnej części rozdziału Doktorant prezentuje standardowe rozwiązania obwodowe ze stali ocynkowanej oraz materiały kompozytowe umacniane włóknami (stosowane włókna węglowe, szklane lub aramidowe).

Z wymienionych materiałów kompozytowych wybrano do dalszych analiz umacniane włóknami węglowymi, które stosowane są najczęściej, co wynika z wysokiej wytrzymałości na rozciąganie z bardzo wysokim modułem sprężystości. Bardzo istotną zaletą kompozytów CFRP jest fakt, że wchodzi we współpracę ze wzmocnianą konstrukcją już przy bardzo niewielkich jej odkształceniach.

W analizach płyt z wzmocnieniami wykorzystano ponownie dwie metody, a mianowicie: badania eksperymentalne na dedykowanym stanowisku doświadczalnym oraz analizy numeryczne metodą elementów skończonych z zastosowaniem profesjonalnego oprogramowania ANSYS.

W badaniach doświadczalnych płyt kompaktowych z wzmocnieniami CFRP głównym celem naukowym było zbadanie wpływu rodzaju materiału wzmocniającego oraz kierunku ułożenia wzmocnień na efekty wytrzymałościowe.

Badaniom poddano trzy warianty wzmocnień:

- wariant 1 - taśmami CFRP ułożonymi poprzecznie (wzdłuż krótszego boku płyty) dla dwóch różnych wytrzymałości taśm (podwarianty 1a i 1b),

- wariant 2 - taśmami **CFRP** ułożonymi wzdłużnie,
- wariant 3 - matami **CFRP** naklejonymi na całą powierzchnię płyty.

Zastosowano takie same płyty pod względem typu i gabarytów jak przy badaniach płyt niewzmocnionych. Wyniki badań eksperymentalnych zaprezentowano w postaci zależności między ugięciem mierzonym w punkcie obserwacji a ciśnieniem działającym na powierzchnię płyty.

Analizując otrzymane wyniki badań płyt wzmocnionych i porównując je z płytami niewzmocnionymi, Doktorant dokonał wyboru najracjonalniejszego wzmocnienia (wariant 1a).

W dalszej części rozdziału przeprowadzono analizę numeryczną badanych płyt ze wzmocnieniami w wariantcie 1a. Model numeryczny płyty ze wzmocnieniami stworzono w oparciu o wcześniejszy model płyty bez wzmocnień, co pozwoliło na wykonanie analiz dla innych wymiarów i liczby wzmocnień. Uzyskano dobrą zgodność modelu numerycznego z wynikami badań doświadczalnych.

W podpunkcie **5.4.** przeprowadzono wstępną optymalizację rozwiązania wzmocnień pod kątem minimalizacji ich powierzchni i z zachowaniem ograniczeń technicznych.

Poszukiwano rozwiązania optymalnego poprzez wielokryterialną analizę 32 wariantów różniących się:

- liczbą taśm na powierzchni płyty: od sześciu do trzech,
- szerokością taśm: dwie,
- długością wzmocnień na powierzchni płyty: cztery wartości, od 40% do 100% szerokości płyty.

Jako kryterium optymalizacji przyjęto poziom wzmocnienia, oczekiwany w stosunku do płyt niewzmocnionych i określony za pomocą dwóch parametrów:

- uzyskanie dwukrotnie większego dopuszczalnego ciśnienia w instalacji w stosunku do płyt niewzmocnionych,
- maksymalne dopuszczalne ugięcie płyty, zapewniające pracę płyty w zakresie liniowo – sprężystym.

Taka analiza wielowariantowa pozwala na wybór najbardziej efektywnych rozwiązań, spełniających określone wcześniej założenia.

Podsumowanie wyników pracy zawiera rozdział **6** (3 strony), w którym stwierdzono, że wszystkie zadania badawcze zostały zrealizowane, a postawione tezy udowodnione. W ostatnim rozdziale wskazano również kierunki dalszych badań.

Podsumowując moją ocenę pracy stwierdzam, że zrealizowano w niej następujące zadania badawcze:

- Przeanalizowano zasady montażu niemetalowych kanałów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych oraz normatywne metody badań wytrzymałościowych tych kanałów,
- Naświetlono aktualny stan wiedzy w zakresie materiałów kompozytowych w budownictwie,
- Opracowano metodę badawczą i przygotowano program badań doświadczalnych płyt kompozytowych,
- Zbudowano autorskie stanowisko badawcze i wykonano na nim badania eksperymentalne,
- Przeprowadzono obliczenia symulacyjne płyt kompozytowych pod kątem ich wytrzymałości i odkształceń, tworząc ich modele numeryczne z zastosowaniem profesjonalnego oprogramowania ANSYS,
- Porównano wyniki badań eksperymentalnych i analiz symulacyjnych,
- Zaproponowano metody wzmocnienia badanych płyt wielowarstwowych i potwierdzono doświadczalnie ich skuteczność,
- Wykonano wielowariantowe obliczenia numeryczne płyt z wzmocnieniami,
- Przeprowadzono wstępną optymalizację rozwiązania wzmocnień pod kątem minimalizacji ich powierzchni i z zachowaniem ograniczeń technicznych.

3. Uwagi krytyczne

W trakcie przygotowania oceny zaprezentowanego w pracy zakresu rozwiązania sformułowanych zadań nasunęły mi się następujące uwagi krytyczne i dodatkowe pytania:

1. Na s.12 w części wprowadzającej omawiającej przedmiot badań przedstawiono dość lakonicznie zadania i klasyfikację wentylacji choć warto byłoby również scharakteryzować elementy, z których składają się instalacje wentylacyjne i klimatyzacyjne
2. W porównywaniu rozwiązań materiałowych zawartym w rozdziale 2 brakuje porównań dotyczących chropowatości bezwzględnej wewnętrznej powierzchni ścianek przewodów, która wpływa znacząco na straty ciśnienia przewodów wywołane tarciami wewnętrznymi, a w efekcie końcowym na zużycie energii elektrycznej do napędu wentylatorów.

3. W Załączniku I zamieszczono porównanie kosztów inwestycyjnych instalacji wentylacyjnej z materiałów kompozytowych i instalacji tradycyjnej (kanały wentylacyjne z blachy stalowej ocynkowanej, łączone za pomocą kołnierzy z uszczelkami i izolowane 30 mm wełną mineralną samoprzylepną z jednostronną okładziną z folii aluminiowej). Analiza ekonomiczna powinna zawierać oprócz kosztów inwestycyjnych, moim zdaniem, minimum analizę kosztów eksploatacyjnych. Najracjonalniejszą byłaby ocena kosztów w cyklu życia budynku lub porównanie metodą kosztów globalnych. Ta uwaga stanowi, zarazem, wskazanie kierunku przyszłych prac Doktoranta.
4. Interesującą informacją, dla mnie jako czytelnika pracy, byłoby podanie i porównanie czasu przeznaczonego na wykonanie stanowiska i przeprowadzenie badań doświadczalnych, a także łącznego czasu obliczeń numerycznych i tworzenia modeli symulacyjnych.

Autor nie ustrzegł się drobnych niedociągnięć i nieścisłości. Niektóre z nich, z obowiązku Recenzenta, przytaczam:

- 1) W bibliografii zastosowano niepełny opis bibliograficzny artykułów (brak podania stron, na których znajdują się artykuły).
- 2) Czytelność rozprawy mogłaby być zwiększona poprzez zastosowanie numeracji rysunków i tablic w odniesieniu do numeracji rozdziałów.
- 3) W części rysunkowej dokumentacji badań zastosowano skróty techniczne. Objasnienia tych skrótów powinny znaleźć się jako legenda przed grupą rysunków dotyczących określonego segmentu badań. Brak takiej legendy utrudnia identyfikację szczegółową prezentowanych przypadków wyników pracy.

Przedstawione powyżej uwagi wynikają głównie z interdyscyplinarnego charakteru pracy, której przedmiot badań – przewody wentylacyjne, znajduje się na styku z inżynierią środowiska i nie umniejszają wartości pracy, a jedynie mogą przyczynić się do udoskonalenia i rozszerzenia dalszych prac.

4. Ocena pracy i wniosek końcowy.

Mgr inż. Krzysztof Kegler w rozprawie doktorskiej, przygotowanej pod opieką prof. Politechniki Łódzkiej dr hab. inż. Roberta Cichowicz i prof. dr hab. inż. Marcina Kamińskiego, rozważał ważną problematykę stosowania kanałów wentylacyjnych z materiałów kompozytowych pod kątem wytrzymałości i odkształceń i połączył w sposób właściwy eksperyment doświadczalny z obliczeniami symulacyjnymi wykonanymi z zastosowaniem profesjonalnego oprogramowania ANSYS.

Przedstawione uwagi nie umniejszają wartości pracy. Założony cel naukowy został zrealizowany, a uzyskane wyniki mają charakter użyteczny. Stwierdzam, że Doktorant potrafi formułować i rozwiązywać problemy naukowe oraz potrafi je wykorzystać również dla celów inżynierskich.

Moim zdaniem wartość użytkową pracy potwierdza przyznany przez UP patent na wynalazek pt. „Wzmocniona płyta wielowarstwowa, zwłaszcza do budowy kanałów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych”, z nr P. 433174, autorstwa prof. dr hab. inż. Henryka G. Sabiniaka i mgr inż. Krzysztofa Kegler. Pozytywna decyzja udzielająca patent została wydana w dn. 16.11.2022r.

Jestem przekonana, że przedstawiona praca doktorska mgr inż. Krzysztofa Keglera odpowiada wymogom Ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Wnoszę więc do Wysokiej Rady do spraw Stopni Naukowych w dyscyplinach Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, Architektura i Urbanistyka Politechniki Łódzkiej o dopuszczenie jej do publicznej dyskusji.

