Warszawa 01.02.2021

dr hab. inż. Artur Piekarczuk, prof. ITB

Instytut Techniki Budowlanej

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Górskiego

pt.: „Współpraca poszycia z płyt warstwowych ze stalową konstrukcją nośną”

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawą formalną opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Górskiego na temat „Współpraca poszycia z płyt warstwowych ze stalową konstrukcją nośną” jest pismo z dnia 14 grudnia 2020 roku Pana prof. dr hab. inż. Tomasza Siwowskiego Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Lądowej i Transportu Politechnik Rzeszowskiej .

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska dotyczy oceny możliwości wykorzystania współpracy poszycia z płyt warstwowych ze stalową konstrukcją nośną. Celem pracy jest ocena dotychczasowych rozwiązań konstrukcyjnych oraz opracowanie nowych, efektywniejszych metod współpracy poszycia z płyt warstwowych w stabilizacji elementów podkonstrukcji. Praca zawiera 239 strony wraz ze spisem treści i wykazem bibliografii. Tekst pracy podzielono na sześć rozdziałów.

W rozdziale 1 przedstawiono cel i zakres pracy, motywację do podjęcia rozprawy doktorskiej, określono kierunki zadań badawczych oraz zdefiniowano dwie tezy.

Rozdział 2 poświęcony jest przeglądowi literatury oraz opisowi typowych rozwiązań technicznych wraz z przedstawieniem sposobów ich projektowania. Opisy zaczerpnięto z branżowych dokumentów normatywnych, dokumentacji i katalogów technicznych oraz literatury.

Rozdział 3 stanowi obszerną część pracy poświęconą analizie obliczeniowej aktualnych rozwiązań technicznych. W rozdziale tym wydzielono cztery sekcje, w których kolejno analizowano nośność i sztywność poszycia oraz połączeń, trwałość, prezentowano badania doświadczalne oraz obliczenia numeryczne fragmentu poszycia.

Rozdział 4 w całości poświęcony jest autorskim propozycjom nowych rozwiązań Doktoranta. Jest to najobszerniejsza część rozprawy doktorskiej i zwiera 6 odrębnych sekcji. W każdej z sekcji Doktorant przedstawia własne propozycje rozwiązań technicznych, wśród których najwięcej uwagi poświęca badaniom eksperymentalnym i obliczeniom numerycznym połączeń klejonych oraz na prezentację prototypu innowacyjnego zamka łączącego płyty warstwę.

Rozdział 5 to syntetyczne podsumowanie rozporowy doktorskiej wraz z określeniem perspektywicznych kierunków dalszych prac badawczych i analitycznych.

W rozdziale 6 zestawiona jest bibliografia, która obejmuje łączeni 155 pozycji literaturowych. Cała rozprawa doktorska zawiera łącznie 205 rysunków oraz 25 tabel.

3. Ocena pracy doktorskiej

3.1. Rozdział 1

Na wstępie rozdziału pierwszego Doktorant przedstawia tło swojej pracy opisując obszar wiedzy, w którym lokuje swoje zainteresowania naukowe. Autor dostrzega szereg problemów technicznych, wynikające z nich zagrożenia oraz możliwości opracowania własnych autorskich rozwiązań. Dalej w sekcji 1.2 zdefiniowany jest „*Cel i zakres pracy*". Moim zdaniem tytuł tej sekcji nie odpowiada jej zawartości. Doktorant zaledwie w dwóch zdaniach definiuje cel pracy (co wydaje się zbytnim uproszczeniem) i dalej opisuje jej zwartość w odniesieniu do odpowiednich rozdziałów a nie (jak deklaruje w tytule) zakres pracy. Wydaje się, że trafniejszą nazwą sekcji 1.2 byłaby „*Zawartość pracy*". W sekcji 1.3, Doktorant określa problem badawczy i tezy pracy. Problemy badawcze zawarte są w pytaniach, które posłużyły Autorowi do sformułowania tez. Sformowanie pytań to pretekst do autorefleksji Doktoranta, który ostatecznie przestawia dwie tezy pracy:

1) *Obecnie stosowane rozwiązania konstrukcyjne płyt warstwowych pozawalają na wykorzystanie poszycie z płyt warstwowych do stabilizacji elementów konstrukcji jedynie w ograniczonym zakresie.*
2) *Przedstawione w pracy innowacyjne rozwiązania mogą znacząco podnieść efektywność współpracy poszycia z płyt warstwowych z konstrukcją w zakresie przenoszenia sił w płaszczyźnie poszycia, w tym wywołanych stabilizacją elementów konstrukcji.*

Pierwsza teza wskazuje na niedostatki obecnego stanu wiedzy w przedmiocie rozprawy doktorskiej i stanowi zapowiedź właściwego rozstrzygnięcia, a mianowicie przedstawienia autorskiego (*innowacyjnego*) rozwiązania naukowego i technicznego, które ów niedostatek zniweluje, czyli udowodnienie drugiej tezy.

W mojej ocenie, takie przedstawienie tezy rozprawy doktorskiej jest prawidłowe. Doktorant, trochę tajemniczo przemilcza jak zamierza tę tezę udowodnić, ale nie jest to zarzut tyko drobna uwaga.

3.2. Rozdział 2

Rozdział drugi ma dwie odrębne sekcje. W pkt 2.1 opisano metodykę projektowania z uwzględnieniem sztywności tarczowej i zasady współpracy blach profilowanych z konstrukcją. W pkt 2.2, znacznie szerzej przedstawiono metodykę projektowania i zasady współpracy tarczowej poszycia z płyt warstwowych z podkonstrukcją wsporczą. Obydwie sekcje z części opisowej (krótki rys historyczny), przechodzą praktycznie bez wyraźnego podziału do części związanej z zasadami

projektowania. W tym miejscu korzystne byłoby rozdzielenie opisu i zasad projektowania. W sekcji 2.1 Autor zamieszcza tablicę nr 2.1 *„Rodzaje łączników mechanicznych”,* jednocześnie w tekście poświęca jedno zdanie na opis przeznaczenia tych łączników. Informacje zawarte w tej tablicy wydają się mało przydatne w zrozumieniu głównego nurtu opisu prezentowanego w rozdziale drugim rozprawy doktorskiej. W tym miejscu warto było zamieścić np. szkice i opisy blach profilowanych pierwszej, drugiej i trzeciej generacji zamiast wspomnianych łączników. Sekcja 2.2 w całości poświęcona jest płytom warstwowym. Autor przedstawia w niej (podobnie jak w sekcji 2.1), krótki rys rozwoju technologii produkcji i metod projektowania. W mojej ocenie zabrakło w tym miejscu nawiązania do krajowego (historycznego już) opracowania autorstwa dr inż. O. Koryckiego[1]. Opracowanie to przez wiele lat było podstawą do obliczeń i badań płyt warstwowych w Polsce i w konsekwencji do udzielenia licznych aprobat technicznych w czasach, gdy nie istniały żadne inne dokumenty odniesienia (normę wyrobu na płyty warstwowe PN-EN 14509 opublikowano dopiero w 2007r.). W sekcji 2.2, Doktorant skupia się głównie na pracy tarczowej płyt warstwowych i nośności połączeń. Brakuje tutaj (i w sekcji wcześniejszej 2.1) nieco szerszej prezentacji problemu, a mianowicie opisu podstawowej funkcji płyty warstwowej, czyli funkcji okładzinowej. Z tym związana jest praca statyczna płyty warstwowej głównie przy zginaniu i oddziaływaniach środowiskowych (śnieg, wiatr, temperatura) oraz technologicznych. W przypadku płyt warstwowych oprócz obciążeń powierzchniowych, istotne jest (z punkty widzenia pracy statycznej płyty i łączników) obciążenie różnicą temperatur, tj. nagrzewanie wewnętrznej i zewnętrznej okładziny zwłaszcza latem. Ten problem pojawia się powszechnie w praktyce inżynierskiej i jest przedmiotem ekspertyz, opracowań studialnych w czasopismach branżowych[2] i publikacji naukowych[3]. W tezie pracy Doktorant skupia się na rozwiązaniu, które umożliwi uwzględnienie sztywności tarczowej płyty warstwowej w analizie stateczności konstrukcji wsporczej, jednak nie doprecyzowuje jakie oddziaływania będą rozważane. Dlaczego rozpatrywana jest tylko praca tarczowa? Co prawda Doktorant wspomina we wstępie o takim schemacie pracy poszycia, ale też jednoznacznie nie wyjaśnia, dlaczego inne oddziaływania zostały pominięte (temperatura, obciążenia powierzchniowe powodujące zginanie płyty)

Po przedstawieniu metod projektowania w sekcji 2.1 i 2.2, brakuje jasnej konkluzji opisującej co wnoszą te metody do rozważań naukowych Doktoranta i jak zostaną one użyte w dalszej części rozporowy doktorskiej.

Rozdział 2 zatytułowany „*Stan wiedzy*” jest napisany porwanie. Jednak uważam, że stan wiedzy to nie tylko praca tarczowa blach profilowanych i płyt warstwowych, ale też szereg innych ważnych zagadnień, o których wspominam wcześniej. Oczywiście podejście Doktoranta do opisu przedstawionego w taki sposób można usprawiedliwiać właściwą tematyką rozprawy doktorskiej, co pozostaje w „wartości domyślnej” opisu, jednak zupełnie inaczej można by odczytywać intencje Autora, jeśli zamiast „wartości domyślnej” pojawiłby się „jawny opis” deklarujący zakres pracy (czego zabrakło w sekcji 1.2).

[1] O. Korycki. „Wytyczne obliczeń statycznych lekkich przegród z wieloprzęsłowych płyt warstwowych typu PW8/B-U1”. *Seria Wytyczne, Poradniki, Instrukcje ITB, nr 197 (1976r)*

[2] A. Szymczak – Graczyk. „Oddziaływanie temperaturą na płyty obudowy ściennej”. *Przegląd Budowlany 7-8 (2013): 67-70*

[3] R. Studziński, Z. Pozorski, and A. Garstecki. "Sensitivity analysis of sandwich beams and plates accounting for variable support conditions." *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences* 61.1 (2013): 201-210.

3.3. Rozdział 3

Rozdział trzeci zatytułowany jest „*Analiza obliczeniowa aktualnych rozwiązań*" i zawiera cztery odrębne sekcje. Można domniemywać (bo nigdzie nie jest to określone wprost), że rozdział ten będzie poświęcony udowodnieniu tezy nr 1), tj.:

1) *„Obecnie stosowane rozwiązania konstrukcyjne płyt warstwowych pozawalają na wykorzystanie poszycie z płyt warstwowych do stabilizacji elementów konstrukcji jedynie w ograniczonym zakresie".*

W tym miejscu, na wstępie lub w pierwszej sekcji oczekiwałem opisu jednego lub kilku typowych lub reprezentatywnych rozwiązań, dla których ów dowód będzie przeprowadzony. Niestety trudno tu doszukać się takiego opisu. Autor na tym etapie nie wspomina też o metodzie jaką zamierza przyjąć w przeprowadzeniu dowodu. Co prawda, w tablicy 3.1 pojawiło się zestawienie oznaczeń płatwi typu IPE z typowymi rozpiętościami przęsła, ale już w tablicy 3.2 zestawione są kompletnie inne, bo zimnogięte profile. Oczywiście, do celów porównawczych w odniesieniu do wymaganej sztywności tarczowej poszycia może to być ważne, ale zdecydowanie nie pomaga w prawidłowej identyfikacji przedmiotu analizy. Dalej pojawia się bardzo skrócony opis próbki płyty warstwowej przeznaczonej do testowania sztywności połączenia oraz równie oszczędny opis stanowiska do badań i programu testów. Rekomendacje ECCS[4] , (powołane w pracy poz. lit.: [40]), przy badawczym wyznaczaniu współczynnika k_v (*shear stiffbess of a fastenning*), zalecają przyjęcie warunków procedury badawczej zgodnej z ECCS/CIB[5]. O ile schemat badania i dobór próbki jest zgodny zaleceniami, to już program badań przyjęty przez Doktoranta odbiega od zaleceń ECCS/CIB co do warunków kontroli badania (przebieg ścieżki równowagi siła ścinająca – przemieszczenie) oraz kryteriów oceny. Doktorant nie wyjaśnia, dlaczego przyjął program badań polegający na cyklicznym obciążeniu próbki testowej. Test obciążenia cyklicznego zalecany jest w rekomendacjach ECCS/CIB do oceny wpływów termicznych, ale na zupełnie innych próbkach i innych warunkach. Prawdopodobnie Doktorant wprowadził w procedurze badania własne autorskie zmiany, które nie zostały jednoznacznie opisane.

Wyniki testów wskazuję, że płyta warstwowa (a właściwie jej poszycie) o analizowanej konstrukcji nie spełnia warunków norm przedmiotowych serii EC3 i nie może być uważana za sztywną tarczę. Nie wyklucza to jednak wykorzystania płyty do stabilizacji płatwi, co prezentuje na wykresie 3.6 przyjmując do oceny element belkowy IPE 160 o rozpiętości 6 m. Dalej Doktorant przeprowadza szereg obliczeń z wykorzystaniem programu LTBeam oraz analiz porównawczych na 9 elementach belkowych (jedno i wieloprzęsłowych) typu IPE o różnych rozpiętościach i przy uwzględnieniu różnych rodzajów utyty stateczności. Analizy są dobrze udokumentowana ilościowo i jakościowo (tablice, wykresy, porównania, opisy, itd.).

Oprócz opisanej wyżej analizy, Doktorant zdecydował się na kolejne skomplikowane obliczenia, które tym razem dotyczyły nośności połączeń (sekcja 3.1.2). Doktorant zdecydował się posłużyć obliczeniami numerycznymi wykonanymi programem Autodesk Simulation Mechanical oraz dla porównania za pomocą zależności wg ECCS[4]. Zadanie numeryczne (jakie postawił przed sobą Doktorant) jest ambitne, ponieważ zdecydował się na wdrożenie najbardziej skomplikowanej analizy

[4] ECCS TC7 - European Recommendations on the stabilization of steel structures by sandwich panels. CIB: W056(2014)

[5] ECCS / CIB Join Committee: Preliminary European Recommendations for the Testing and Design of Fastenings for Sandwich Panels. ECCS publication No. 127, 2009

GMNIA, która dotyczy analiz geometrycznie i fizycznie nieliniowych z uwzględnieniem imperfekcji. Ten rodzaj analizy wymaga precyzyjnego przygotowania danych wejściowych. Doktorant dosyć oszczędnie prezentuje te dane. Brakuje tu głównie opisu modelu materiału przyjętego do obliczeń, zasad ustalania, przyjmowania i implementacji imperfekcji geometrycznych oraz wzmianki o przyjętych metodach analizy. W tej samej sekcji, Doktorant analizuje nośność połączeń posługując się zależnościami analitycznymi, które porównuję z wynikami obliczeń numerycznych. Ostatecznie w sekcji 3.1.3, Doktorant wyciąga prawidłowe wnioski z analiz oraz prezentuje jakościową i ilościową ocenę nośności połączeń.

W sekcji 3.2, przestawiono zagadnienia związane z trwałością połączeń. Doktorant analizuje wpływ obciążeń klimatycznych (wiatr, śnieg) na stabilność i nośność połączeń. Na określenie tych cech Doktorant używa nazwy „*trwałość*". To jest dosyć mylące, ponieważ trwałość oznacza zazwyczaj zagadnienia związane z korozją materiałów w wyniku działania czynników atmosferycznych. Oczywiście, trwałość to też pogorszenie właściwości użytkowych podczas eksploatacji budynku wynikające z przebiegu i sposobu użytkowania w tym także oddziaływań zmiennych. W takim właśnie rozumieniu Doktorant przedstawia swoje kolejne analizy. Szczegółowo przedstawia dane dotyczące obciążenia śniegiem i wiatrem, w tym także zaczerpnięte z zasobów archiwalnych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Moim zdaniem dane te są zbyt skromne, aby na ich podstawie przyjmować uogólnienia opisu jakiegoś zjawiska, ale do celów poglądowych można przyjąć taki tryb postępowania. Ciekawostką jest zastosowanie przez Doktoranta analizy numerycznej (program Autodesk Robot Structural Analysis) do wyznaczenia rozkładu ciśnień na przykładowym budynku. Analiza tego typu w tej klasie oprogramowania jest bardzo szacunkowa. Do tych celów najlepsze są dedykowane programy do analiz CFD np.: Fluent albo skromniejszy Ansys CFX. Na rys. 3.26, Doktorant zamieszcza mapy rozkłady ciśnień, ale nie podaje oznaczenia wartości ciśnień przy opisie skali.

Analizy obciążeń środowiskowych posłużyły Doktorantowi w sekcji 3.2.2 do zaplanowania i zrealizowania badań związanych z obciążeniem cyklicznym, które mają odwzorowywać typowe zmienności tych oddziaływań. W pierwszej kolejności Doktorant skupia się na określeniu wpływy obciążeń zmiennych na trwałość połączenia wykorzystując przy tym stanowisko do badań opisane wcześniej w sekcji 3.1.1. Trudno przy tym jednoznacznie stwierdzić, czy Doktorant w tym miejscu zajmuje się ścinaniem czy też innym kierunkiem oddziaływania. Jeśli wykorzystuje urządzenie opisane w pkt 3.1.1, to można domniemywać, że chodzi o ścinanie. Nie jest to nigdzie jednoznacznie opisane, co utrudnia właściwą identyfikację celu badań. Doktorant przyjmuje różne scenariusze zmienności obciążenia i zgodnie z założeniami realizuje badania. Na rys. od 3.28 do 3.43, przestawione są wyniki rejestracji siły w funkcji przemieszczenia oraz przemieszczenia w funkcji czasu. Wykresy przedstawiające cykliczne zmienne dane są nieczytelne. Doktorant bezkrytycznie zamieścił wydruk z rejestratora danych zamiast poddać je obróbce do stanu umożliwiającego obserwację zmienności danych. Zamiast wykresów z wyraźną pętlą histerezy widoczne są grafiki z czarnymi plamami. Zdecydowanie nie pomaga to w odczytaniu wyników. W podsumowaniu tej sekcji Doktorant dokonuje szczegółowej oceny wyników badań w odniesieniu do wytypowanych wcześniej ośmiu próbek płyt warstwowych.

W aneksie B rekomendacji ECCS/CIB[5], podano kompleksowy zakres badań zamocowań stosowanych w płytach warstwowych. Mimo, że zakres badań zawarty w rekomendacjach dotyczy oceny połączeń (a nie sztywności tarczowej poszycia), to metody badań i kryteria oceny wyników w nich zawarte mogłyby znacząco wzbogacić zakres prac Doktoranta. Moim zdaniem warto było

skorzystać z tych propozycji tym bardziej, że Doktorant powołuje poz. lit.: [40], (ECCS[4]) , która bezpośrednio nawiązuje do metod badań pisanych w ECCS/CIB[5]. Szkoda, że Doktorant zajął się tylko ścinaniem pomijając inne ważne skutki oddziaływań nie tylko wiatru śniegi i ciężaru własnego, ale też oddziaływań termicznych. Trudno tutaj jednak czynić z tego powodu zarzuty Doktorantowi, gdyż (jak wspomniałem wcześniej) zajmuje się on wpływem poszycia płyt warstwowych na stateczność podkonstrukcji stalowej.

W sekcji 3.2.3, Doktorant analizuje wpływ owalizacji otworów na nośność stabilizowanego elementu. W tym przypadku posługuje się obliczeniami numerycznymi na przykładzie jednoprzęsłowej belki typ „Z". Podobnie jak wcześniej w sekcji 3.1.2, Autor stosuje analizę GMNIA, ale tym razem już bardziej szczegółowo opisuje rodzaje imperfekcji przyjętych do analizy. Nadal brakuje jednak szczegółowego opisu modelu materiału, co w przypadku analizy GMNIA jest istotne. W podsumowaniu Doktorant podaje ilościową i jakościową ocenę wpływu owalizacji otworów na nośność płatwi.

W ostatniej sekcji rozdziału 3, tj. w pkt 3.3, Doktorant realizuje badania w pełnej skali o analizy numeryczne z wykorzystaniem programu Ansys. Celem badań i obliczeń jest określenie możliwości współpracy poszycia z podkonstrukcją stalową. Schemat badań dotyczy sztywności przepony na ścinanie i przyjęty jest zgodnie z rys. 2.4 z pkt 2. Doktorant szczegółowo przedstawia opis elementu testowego, program badań oraz schemat pomiarowy. Badania przeprowadzone są z należytą starannością, a wyniki prezentowane są właściwie. W tym samym punkcie Doktorant wykonuje obliczenia numeryczne modelu przyjętego w badaniach. Niestety na wstępie nie wyjaśnia w jakim celu analizuje model, dla którego wcześniej wykonał badania laboratoryjne w pełnej skali. Dopiero rys. 3.89 ujawnia właściwy cel tych zabiegów. Okazuje się bowiem, że Autor postanowił przeanalizować łączniki zastosowane do przytwierdzenia płyty warstwowej do łatwi. Ten fakt sygnalizuje bardzo oszczędnie, skupia się natomiast na potwierdzeniu (na podstawie porównania wyników badań i obliczeń) poprawności modelu numerycznego w odniesieniu do elementu testowego. Cel takiego porównania nadal pozostaje nieznany. W procesie przygotowania danych do modelu numerycznego, Doktorat wykonuje statyczną próbę rozciągania tzw. „wiosełek" wyciętych z okładziny płyty warstwowej elementu testowego. W pracy wykonano testy na trzech próbkach, natomiast w praktyce laboratoryjnej takie testy (do celów identyfikacyjnych) wykonuje się zazwyczaj na większej liczbie próbek (min. 5 zgodnie z PN-EN 1993-1-3 pkt 3.2.1 (2) lub większej zgodnie z wymaganiami norm branżowych). W przypadku wyznawania charakterystyki odkształcenie – naprężenie, która dalej ma służyć do określenia modelu przyjmowanego w obliczeniach, dobrą praktyką jest wykonanie kilkudziesięciu prób statycznego rozciągania stali. Doktorant przyjmuje do obliczeń numerycznych model materiału oznaczony linią przerywaną na rys. 3.81. Takie podejście jest niewłaściwe. W przypadku analizy GMNIA należało skorzystać z opisu modelu materiału zgodnie z PN-EN 1993-1-5 Załącznik C6, w którym opisano zależności modelu realistycznego lub standardowych modeli sprężysto – plastycznych (np. z półką plastyczną bez wzmocnienia).

Pewien niedosyt w prezentacji wyników pracy pozostawia brak podsumowania rozdziału 3. Co prawda, fragmentaryczne stwierdzenia udowadniające tezę 1), pojawiają się w różnych sekcjach tego rozdziału, jednak brakuje tu kompleksowego podsumowania.

Rozdział trzeci zwiera całe spektrum umiejętności Doktoranta. Były tu badania laboratoryjne, obliczenia numeryczne, analizy, porównania i zestawienia, czyli wszystko to co mieści się w pojęciu pracy koncepcyjnej, kreatywnej i oryginalnej. To niewątpliwie jest osiągniecie naukowe Doktoranta.

Zabrakło jednak uporządkowania i systematyczności, co nie umniejsza osiągnięciu naukowemu Autora, ale pozostawia pewien niedosyt.

Ostatecznie Doktorant udowadnia tezę 1) podając jakościową i ilościową ocenę współpracy typowych rozwiązań poszycia z płyt warstwowych w kontekście współpracy z konstrukcją stalową.

3.4. Rozdział 4

Rozdział czwarty zatytułowany jest „*Propozycje nowych rozwiązań*" i zawiera sześć odrębnych sekcji. Rozdział poświęcony jest propozycjom modyfikacji dotychczasowych rozwiązań konstrukcyjnych oraz koncepcjom rozwojowym nowych systemów konstrukcyjnych, które - zdaniem Doktoranta - mają zniwelować wady i niedostatki tradycyjnych rozwiązań przedstawionych w rozdziale 3. Pomysł i metodyka prezentacji nawiązują bezpośrednio do przedstawienia dowodu tezy 2), tj.:

> 2) *„Przedstawione w pracy innowacyjne rozwiązania mogą znacząco podnieść efektywność współpracy poszycia z płyt warstwowych z konstrukcją w zakresie przenoszenia sił w płaszczyźnie poszycia, w tym wywołanych stabilizacją elementów konstrukcji.*

Już na wstępie rozdziału, Doktorant nawiązuje do ograniczeń i braku efektywności rozwiązań tradycyjnych opisanych obszernie w rozdziale trzecim i zapowiada sposób prezentacji rozwiązań w rozdziale czwartym, zestawiając je w dwie grupy. Pierwsza grupa dotyczy koncepcji modyfikacji rozwiązań aktualnie dostępne na rynku (pkt 4.1 - 4.4), grupa druga to propozycja nowych autorskich rozwiązań (pkt 4.5 i 4.6).

Trzy pierwsze sekcje to skrócony opis modyfikacji dotychczasowych rozwiązań. Modyfikacje polegają na zwiększeniu ilości łączników głównych (pkt 4.1), zastosowaniu dodatkowych blach łączących styki okładziny dolnych płyt warstwowych (pkt 4.2) oraz zastosowaniu sztywnych łączników, umożliwiających redystrybucję siły ścinającej na dolne i górne poszycie płyty warstwowej (pkt 4.3). Doktorant opisuje zalety i wady takich rozwiązań, z przewagą tych drugich, co umniejsza ich potencjał aplikacyjny. Słusznie zauważa, że różne konfiguracje zastosowań łączników mechanicznych nie zapewniają uzyskanie odpowiedniej sztywności tarczowej płyt warstwowych, a ich praktyczne zastosowanie jest kłopotliwe.

Sekcja 4.4 dotyczy połączeń klejonych. Doktorant poświecą temu zagadnieniu najwięcej miejsca w swojej rozprawie doktorskiej.

Po przedstawieniu informacji wstępnych, Doktorant dokonuje wyboru trzech rodzajów połączeń (dwa kleje i jedna taśma akrylowa), które będą przedmiotem jego dalszych rozważań. Autor wspomina o przeanalizowania dostępnych rozwiązań na rynku. Szkoda, że w tym miejscu nie zaprezentował analizowanego zestawu klejów ani kryteriów ich dobru. W sekcji 4.4.2, Doktorant przeprowadza badania odporności na ścianie na stanowisku i według schematu obadania jak w pkt 3.1.1. tj. odporności na ścinanie z zastosowaniem małej próbki. Niestety Autor nie podaje żadnych informacji dotyczących rodzaju płyty warstwowej przyjętej do badań. Jeśli w badaniach zastosowano by tę samą płytę w warstwową co w sekcji 3.1.1, wówczas można by porównywać wyniki nośności połączenia mechanicznego i klejonego. Zastanawiające jest też, dlaczego Doktorant przyjął inne ułożenie płyty względem kierunku działania siły. Na rys 3.2 (badania z połączeniem mechanicznym) ścinanie następuje wzdłuż przetłoczeń blach, natomiast w przypadku połączenia klejonego (rys. 4.6 i rys. 4.7) profil ułożony jest w poprzek przetłoczeń. W tekście brakują uzasadnienia takiego ułożenia

próbki testowej. Sytuacja wygląda podobnie z przyjętym programem obciążenia. W sekcji 3.1.1, Doktorant przyjmuje obciążenie narastające obciążenie statyczne w kilku cyklach i przy różnych wartościach (rys. 3.3), natomiast przy testowaniu połączeń klejonych nic o tym nie wspomina, a wykresy zależności siła – przemieszczenie (rys. 4.18, rys. 4.19) wskazują raczej na pojedynczy cykl obciążenia. Te niekonsekwencje wymagają komentarza lub wyjaśnienia.

Ostatecznie, po serii prób obciążeń statycznych, dokonano oceny i wyboru połączenia klejonego do dalszych testów. Szkoda, że Doktorant nie pokusił się o porównanie wyników badań połączenia mechanicznego i klejonego.

W sekcji 4.4.3. Doktorant przedstawia metodykę i wyniki badań elementu testowego w pełnej skali z uwzględnieniem połączenia klejonego. Stanowisko do badań wraz z opomiarowaniem jest analogiczne jak w rozdziale 3 (sekcja 3.3). Autor dokonuje kompleksowej oceny jakościowej i ilościowej połączenia klejonego w porównaniu do wyników badań identycznego elementu testowego z połączeniem mechanicznym. Dodatkowo zrealizowano również badania elementu testowego z połączeniem hybrydowym (klejenie i połączenia mechaniczne). Oprócz badań, Doktorant wykonał obliczenia numeryczne uzyskując dobrą zgodność wyników z wynikami testów. Na uwagę zasługuje fakt, że Doktorant bardzo skrupulatnie, zestawia wyniki badań i obliczeń w różnych konfiguracjach, interpretuje je i wyciąga poprawne wnioski. Oprócz badań i obliczeń numerycznych, Doktorant przedstawia w sekcji 4.4.5 analityczny model z uwzględnieniem połączenia klejonego wprowadzając jednocześnie szereg autorskich usprawnień. Wyniki obliczeń analitycznych zostały zilustrowane przykładami, które porównano z wynikami obliczeń numerycznych. W sekcji 4.4.6, Doktorant podsumowuje wyniki prac dotyczących połączenia klejonego. Wzorem poprzednich rozdziałów, podsumowanie jest bardzo skromne i ograniczone do wypunktowania zalet i wad takiego rozwiązania.

Dwie ostatnie sekcje rozdziału czwartego poświeceń są koncepcyjnym rozważaniom dotyczącym zastosowania odpowiedniego zamka łączącego płyty warstwowe. W sekcji 4.5, Doktorant bardzo skrótowo przedstawia koncepcję poszerzenia zamka i stosowania zszywających łączników mechanicznych. Krótko komentuje zalety i wady takiego rozwiązania, ale go nie rozwija.

W sekcji 4.6, Doktorant przedstawia autorską koncepcję konstrukcji zamka. Autor opracowuje kształt zamka i sposób połączenia, a następnie przeprowadza obliczenia numeryczne przyjętego modelu. W kolejnym etapie nowy zamek zostaje przyjęty do obliczeń numerycznych modelu pełnowymiarowego. W tym właśnie miejscu przydaje się zweryfikowany wcześniej (w sekcji 3.3 i 4.4) pełnowymiarowy modelu poszycia wraz z podkonstrukcją. Doktorant testuje wpływ nowego typu zamka na nośność i sztywność poszycia w różnych wariantach mocowania mechanicznego. Ostatecznie Doktorant dokonuje oceny tego rozwiązania wraz z propozycją dalszych modyfikacji.

3.5. Rozdział 5

W rozdziale piątym, Doktorant podsumowuje wyniki swojej pracy i określa kierunki dalszych badań. Na podstawie badań i obliczeń typowych rozwiązań analizowanych w trzecim rozdziale rozprawy doktorskiej stwierdza *„…w żadnym z analizowanych przypadków nie udało się osiągnąć obliczeniowo pełnego zabezpieczenia belki przed zwichrzeniem…*”. W oczywisty sposób Doktorant dowodzi pierwszą tezę rozprawy doktorskiej:

1) *Obecnie stosowane rozwiązania konstrukcyjne płyt warstwowych pozawalają na wykorzystanie poszycie z płyt warstwowych do stabilizacji elementów konstrukcji jedynie w ograniczonym zakresie*

Dowód tej tezy jest właściwy i uprawniony, chociaż w mojej ocenie zakrakało szerszego spojrzenia na strukturę samego zjawiska, bo na przykład nie uwzględniono wpływu temperatury (można było też udowodnić, że ten wpływ jest znikomy).

W tym samym rozdziale Doktorant podsumowuje propozycje autorskich rozwiązań dotyczących metod połączeń poszycia płyt warstwowych w celu polepszenia właściwości usztywniających podkonstrukcję stalową. Tym zagadnieniom poświęcony jest cały czwarty rozdział rozprawy doktorskiej. Na podstawie badań i obliczeń, Autor dowodzi skuteczności niektórych rozwiązań (połączenia klejone z mocowaniem na czterech krawędziach), ale też wskazuje niedostatki innych rozwiązań przyjętych do analizy. Oprócz połączeń klejonych Doktorant przedstawia prototyp innowacyjnego rozwiązania zamka płyty warstwowej, które może poprawić współpracę poszycia z podkonstrukcją. Wszystko to jest udowodnieniem drugiej tezy:

2) *Przedstawione w pracy innowacyjne rozwiązania mogą znacząco podnieść efektywność współpracy poszycia z płyt warstwowych z konstrukcją w zakresie przenoszenia sił w płaszczyźnie poszycia, w tym wywołanych stabilizacją elementów konstrukcji.*

Doktorant uwodnił obydwie tezy przedstawiając liczne wyniki badań eksperymentalnych, obliczeń i analiz porównawczych. Przedstawił jakościową i ilościową ocenę przyjętych do analizy rozwiązań typując te, które jego zdaniem należy dalej rozwijać w przyszłych badaniach.

3.6. Bibliografia

Bibliografia zawiera ogółem 155 pozycji. Zasadniczo, pozycje bibliografii związane są tematycznie z rozprawą doktorską. Większość z nich to opracowania krajowe (głównie pozycje książkowe i artykuły branżowe), część pozycji to opracowania zagraniczne. W biografii znalazły się równie dokumenty normatywne oraz rekomendacje europejskie. Cześć pozycji ma charakter zdecydowanie archiwalny, np. pozycja [75] autorstwa M. T. Hubera z 1956r czy też poz. [84] autorstwa S. Kusia z 1967r. Moim zdaniem, użycie podobnych pozycji jest uzasadnione tylko w przypadku odniesień historycznych. Oprócz wspomnianych archiwalnych pozycji, Doktorant sięga również po współczesne opracowania, z których najnowsza to poz. [116] autorstwa B. Piątka, datowana na 2019r. Pewien niedosyt pozostawia fakt, że Doktorant w swojej pracy posługuje się współczesnymi, numerycznymi technikami obliczeń nie odnosząc się przy tym do licznych prac naukowych z tego zakresu. Trochę niewygodna jest również notacja powołań. Autor przyjął w kolejność alfabetyczną, natomiast w mojej (subiektywnej) ocenie, wygodniejsza w identyfikacji jest notacja według kolejności cytowania w tekście.

3.7. Układ pracy i poprawność językowa

Struktura pracy doktorskiej obejmująca sześć rozdziałów (wprowadzenie, stan wiedzy, analiza obliczeniowa aktualnych rozwiązań, propozycje nowych rozwiązań, podsumowanie i kierunki dalszych prac oraz literatura) jest poprawna i czytelna. W rozdziale pierwszym Doktorant przedstawia cel i zakres pracy oraz dwie tezy, które są motywem przewodnim kolejnych rozdziałów. Rozdział drugi (stan wiedzy) jest skromny, ale wytaczający do zrozumienia aktualnych problemów, którymi zajmuje się Doktorant w swojej pracy. Rozdział trzeci i czwarty są najważniejsze, bo służą do udowodnienia

wcześnie zdefiniowanych tez. Zakres i metody dowodów (badania, obliczenia) przyjęte przez Doktoranta, sprawiają, że rozdziały te są najobszerniejsze pod względem objętościowych, ale też merytorycznym. Ilość badań i obliczeń niekiedy przytłacza podobnie jak zmienność przyjętych parametrów. W niektórych miejscach trudno jest trzymać się jednej myśl przewodniej, ponieważ parametry analiz zmieniają się z bliżej nieokreślonych przyczyn. Ostatecznie rozdziały trzeci i czwarty spełniają swoje zadanie, mimo że brakuje w nich jednoznacznie przedstawionych sekcji z podsumowaniem uzyskanych rezultatów. Rozdział piąty to zwięzłe i trafne podsumowanie całej pracy oraz przedstawienie perspektyw kolejnych prac. Ostatni rozdział zawiera bibliografię.

W mojej ocenie struktura rozprawy doktorskiej jest bardzo dobra mimo drobnych usterek. Doktorant właściwie identyfikuje problem i go rozwiązuje dobierając przy tym różne metody analiz. Poszczególne rozdziały są właściwe zatytułowane, a co ważniejsze ich treść jest spójna z naukową metodyką rozwiązywania złożonych zagadnień fizycznych. Język i pisownia są prawidłowe, chociaż w niektórych miejscach nagromadzenie pojęć technicznych jest zbyt obfite, co powoduje pewną uciążliwość. W zdecydowanej większości grafiki zamieszczone w pracy są wykonane starannie i czytelnie (wyjątek stanowią rysunki przedstawiające cykliczne obciążenie).

4. Uwagi

4.1. Pytania i zagadnienia problematyczne

Po przeprowadzeniu oceny rozprawy doktorskiej przedstawionej w pkt. 3 niniejszej recenzji, nasuwa się szereg szczegółowych uwag, na które oczekiwałbym wyjaśnień i komentarzy ze strony Doktoranta:

1. Dlaczego w analizie współpracy poszycia z płyt warstwowych ze stalową konstrukcją nośną nie uwzględniono odziaływań termicznych?
2. Dlaczego w badaniach i obliczeniach uwzględniono wyłącznie siły działające w płaszczyźnie poszycia (ścinanie)?
3. Proszę o wyjaśnienie pewnej niekonsekwencji w doborze elementów podlegających sprawdzeniu w rozdziale 3. W sekcji 3.1.1 badana jest nośność poszycia i połączenia przy zastosowaniu płyty warstwowej PU-W-ST grubości 100 mm (okładzina ze stali S280GD, grubość 0,5 mm i płatwi w postaci ceownika (o bliżej nieokreślonych parametrach). Dalej przy określaniu nośności połączeń w sekcji 3.1.2 analizowana jest płatew o rozpiętości 9 m wykonana z profili gorącowalcowanego IPE 240. W sekcji 3.2.3 analizowana jest płatew o rozpiętości 5 m z profilu zimnogiętego typu Z300, natomiast w sekcji 3.3 badany jest model w pełnej skali z płatwiami IPE 160 z płytą warstwową typu PU-PIR-W-ST grubości 80mm (okładzina ze stali S320GD, grubość 0,5 mm). Dlaczego Doktorant stosuje różne parametry modeli badawczych? Jakie było kryterium dobru? Jaki być cel takiego zróżnicowania?
4. Proszę o sprecyzowanie opisu danych przyjętych do obliczeń GMNIA w sekcji 3.1.2, w szczególności przyjętego modelu materiału, rodzaju imperfekcji i sposobu jej implementacji w modelu numerycznym. Proszę też o odniesienie się do nieprawidłowości zastosowania modelu materiału (opis w pkt 3.3 niniejszej recenzji) w obliczeniach elementu pełnowymiarowego w odniesieniu do sekcji 3.4 rozprawy doktorskiej (rys. 3.81).
5. Proszę przedstawić kryteria doboru kleju przyjętego do badań w sekcji 4.4.2.
6. Proszę podać jaki typ płyty warstwowej przyjęto do badań w pkt 4.2.2 i czy jest on zgodny z typem przyjętym do badań w pkt 3.1.1. Jeśli są to różne typy płyt, to proszę wyjaśnić tę rozbieżność.
7. Proszę wyjaśnić, dlaczego do badań nośność i na ścinanie małych próbek z połączeniem mechanicznym i klejonym, przyjęto inne programy obciążenia.

4.2. Usterki:

Zestawienie usterek ma charakter porządkowy i nie wymaga komentarza Doktoranta.

- Na rys. 3.26 nie pisano skali map rozkładu ciśnień.
- Na str. 99 błędnie oznaczono rysunek rozmieszczenia tensometrów – jest 3.67 a powinno być 3.65.
- Na str. 108, Doktorant napisał: *„… wartość odczytanych przy pomocy tensometrów naprężeń…”*. Tensometrem można pomierzyć jedynie odkształcenie i dalej dysponując stałą fizyczną materiału (moduł Younga) można wyznaczyć naprężenie. Zatem określenie „…pomiar naprężenia…” jest niewłaściwy i często nadużywany w różnych opracowaniach technicznych.
- Wykresy siła - przemieszczenie i siła – czas przy obciążeniach cyklicznie zmiennych w sekcji 3.2.2 i 4.4.2 są nieczytelne.
- Podpis rysunku 4.67 znalazł się na niewłaściwej stronie.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Zagadnienie dotyczące współpracy poszycia z płyt warstwowych ze stalową konstrukcją nośną jest trudne i kłopotliwe, dlatego też niechętnie rozpatrywane w praktyce inżynierskiej. Trudność polega na precyzyjnym określeniu parametrów poszycia, które skutecznie ustabilizuje element podkonstrukcji stalowej, natomiast kłopotliwość tkwi głównie w pracochłonności przy realizacji tego zadania.

Jeśli te niedogodności zostaną przezwyciężone, wówczas możliwe jest osiągnięcie właściwego celu, czyli optymalizacji wymiarowej elementów konstrukcyjnych. Doktorant dostrzega ten potencjał i w tym obszarze lokuje swoje zainteresowania naukowe. Właściwie identyfikuje cel i definiuje dwie tezy pracy, które udowadnia wykorzystując wiedzę naukową i umiejętności inżynierskie.

Doktorant nie ustrzegł się drobnych nieścisłości, które wynikają z pewnej niekonsekwencji w realizacji celów. Niewątpliwie jest to obszar do dalszego doskonalenia. Nie wpływ to jednak na ogólną ocenę rozprawy doktorskiej, która potwierdza oryginalność rozwiązania naukowego, wiedzę teoretyczną Doktoranta oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Oryginalność rozwiązania naukowego polega na wyznaczeniu parametrów oraz opracowaniu metod oceny połącznia klejonego płyt warstwowych z podkonstrukcją stalową a także na opracowaniu innowacyjnego systemu zamków płyt warstwowych, polepszających parametry nośności poszycia.

Ogólna wiedza teoretyczna Doktoranta w dyscyplinie Inżynieria Lądowa i Transport została zaprezentowana w sposobie rozwiązywania problemów naukowych i technicznych. Doktorant właściwie zidentyfikował te problemy na podstawie analizy literatury i własnej wiedzy. Umiejętnie zastosował postanowienia norm przedmiotowych i zaleceń europejskich w rozwiązaniu problemów technicznych. Wykazał się wszechstronną umiejętnością wykorzystywania narzędzi obliczeniowych w postaci programów do analiz numerycznych Metodą Elementów Skończonych. W swojej pracy wykorzystał aż cztery różne programy obliczeniowe (LTBeam, Autodesk Simulation Mechanical, Autodesk Robot Structural Analysis, Ansys) do rozwiązania zadań o różnym stopniu trudności.

Umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy Doktoranta polega na zaplanowaniu i wykonaniu badań eksperymentalnych (na małych próbkach oraz na elementach pełnowymiarowych) wraz z oceną i interpretacją wyników, a także na kompleksowym podejściu analitycznym w porównaniu wyników badań i obliczeń, w tym także na opracowaniu autorskich modyfikacjach metod analiz.

Mając na uwadze powyższe stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska, pt.: *„Współpraca poszycia z płyt warstwowych ze stalową konstrukcją nośną*" spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki[6].

W związku z tym, wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Lądowej i Transportu Politechniki Rzeszowskiej o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Marcina Górskiego do publicznej dyskusji.

dr hab. inż. Artur Piekarczuk, prof. ITB

[6] Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r. nr 65, poz. 595 z poźn. zm.).