

Warszawa, dnia 10.09.2022

dr hab. inż. Tomasz Sokół
Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Lądowej
Al. Armii Ludowej 16
00-637 Warszawa

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Szymona Wojciechowskiego pt. „Analiza doświadczalna, numeryczna i teoretyczna skręcanych statycznie paneli warstwowych o sztywnych okładzinach i podatnym rdzeniu”

1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania recenzji stanowi pismo prof. dr hab. inż. Jacka Pielechy, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Poznańskiej, z dnia 6 lipca 2022 roku, informujące mnie o powierzeniu mi funkcji recenzenta (zgodnie z uchwałą RDILiT PP nr RD/d/14/02/2022 z dnia 28 czerwca 2022r).

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Szymona Wojciechowskiego pt. „Analiza doświadczalna, numeryczna i teoretyczna skręcanych statycznie paneli warstwowych o sztywnych okładzinach i podatnym rdzeniu” przygotowana na Wydziale Inżynierii Lądowej i Transportu Politechniki Poznańskiej. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Zbigniew Pozorski, profesor Politechniki Poznańskiej; promotorem pomocniczym jest dr inż. Anna Knitter-Piątkowska.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy i ocena zasadności podjęcia tematu

W przedłożonej do oceny pracy badano zachowanie paneli warstwowych na skręcanie. Przedmiotem badań były płyty warstwowe gładkie (bez profilowania blach okładzin) z rdzeniem wypełnionym pianką poliizocyanurową, jednak wyniki prezentowane w pracy mają charakter bardziej uniwersalny. W ramach podjętych badań przeprowadzono wiele analiz doświadczalnych i numerycznych dla różnych rozmiarów paneli i różnych warunków brzegowych, odpowiadających skręcaniu swobodnemu i skrępowanemu. Uzyskane wyniki porównano z wynikami analitycznymi, co pozwoliło na weryfikację poprawności istniejących teorii skręcania paneli warstwowych. Na uwagę zasługuje przygotowanie autorskiego stanowiska badawczego umożliwiającego przeprowadzenie testów laboratoryjnych i duża staranność ich wykonania.

Temat podjęty w pracy jest aktualny badawczo i ważny dla praktyki projektowej, dlatego uważam jego podjęcie za celowe.

4. Zakres i treść rozprawy

Rozprawa jest napisana w języku polskim, liczy 297 stron, w tym 241 stron części zasadniczej i 56 stron załączników, zawiera 161 rysunków i 25 tabel (ponadto kolejne 36 tabel, w których podano szczegółowe dane liczbowe dotyczące prowadzonych testów zamieszczono w załącznikach). Praca składa się z pięciu rozdziałów, ponadto zawiera adekwatne spisy treści, literatury, rysunków i tabel oraz wymagane Ustawą streszczenia w języku polskim i angielskim. Bibliografia liczy 83 pozycje literaturowych i 6 referencji do wytycznych normowych Eurokod.

W pierwszym rozdziale pracy Autor przedstawia i uzasadnia tematykę podjętych badań dotyczących skręcania paneli warstwowych. Wskazuje cel i zakres pracy oraz jasno formułuje tezy spodziewanych wyników badań. W rozdziale tym zawarto również obszerny przegląd literatury, pozwalający na ocenę bieżącego stanu wiedzy związanej z tematyką pracy.

Drugi rozdział pracy zawiera teoretyczne podstawy skręcania paneli warstwowych w ujęciu belkowym i płytowym. Na wstępie omówiono zagadnienia skręcania swobodnego i skrępowanego prętów pryzmatycznych, co pozwoliło na definicję używanych dalej pojęć sztywności skrętnej i giętno-skrętnej. W dalszej części pracy przedstawiono trzy teorie i wynikające z nich wzory analityczne pozwalające na szacowanie sztywności skrętnej paneli warstwowych: Seide (1956), Stamm-Witte (1974), Höglund (1986). Następnie przeprowadzono ciekawą analizę porównawczą sztywności skrętnej paneli warstwowych o różnych wymiarach przekroju poprzecznego, otrzymane wg wzorów wyprowadzonych na bazie omawianych wcześniej teorii. W ostatniej części tego rozdziału przedstawiono wzory opisujące rozkłady naprężeń stycznych w okładzinach i rdzeniu.

Trzeci, najobszerniejszy rozdział pracy, stanowi jej zasadniczą część, która łącznie z załącznikami zajmuje 180 stron, czyli objętościowo około 61% rozprawy. W rozdziale tym Autor szczegółowo przedstawia przeprowadzone badania laboratoryjne. Pierwsza część rozdziału zawiera opis wstępnych badań materiałowych, służących do wyznaczenia istotnych w dalszej analizie własności mechanicznych komponentów paneli warstwowych (moduły sprężystości podłużnej okładzin i rdzenia oraz moduł ścinania rdzenia). W drugiej części tego rozdziału znajdujemy precyzyjny opis autorskiego stanowiska badawczego, pozwalającego badać zachowanie paneli warstwowych na skręcanie swobodne i skrępowane w dość szerokim zakresie wymiarów przekroju poprzecznego. Warto wspomnieć, że stanowisko to zostało zgłoszone 11.06.2021 w Urzędzie Patentowym Rzeczypospolitej Polskiej o udzielenie patentu na wynalazek. Autor pracy, oprócz szczegółowego opisu samego urządzenia opisuje również szczegółowo proces kalibrowania tego urządzenia, które polegało m.in. na uwzględnieniu oporów łożysk i sztywności skrętnej samego stanowiska. Trzecia, najistotniejsza część tego rozdziału przedstawia wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych. Na uwagę zasługuje skrupulatność Autora pracy na każdym etapie prowadzonych badań laboratoryjnych, począwszy od systematycznego przygotowania próbek i stanowiska badawczego, poprzez przeprowadzenie samych badań i wreszcie zebraniu wyników i ich wnikliwej analizie.

W rozdziale czwartym Autor przedstawia wyniki analiz numerycznych przeprowadzonych z zastosowaniem oprogramowania Simulia Abaqus. W kolejnych punktach tego rozdziału przedstawione zostały następujące zagadnienia: 1) budowa modelu płytowo-bryłowego paneli warstwowych, ze szczególnym uwzględnieniem subtelnych warunków brzegowych odpowiadających możliwie dobrze warunkom laboratoryjnym; 2) analiza wrażliwości na

zmianę parametrów materiałowych i ich możliwie najlepszy dobór w docelowym modelu obliczeniowym; 3) wybór odpowiedniej gęstości siatki metody elementów skończonych w celu zapewnienia wymaganej dokładności obliczeń (badanie zbieżności MES dla przyjętego modelu przy różnych gęstościach siatek MES); 4 i 5) analizy skręcania swobodnego i skrępowanego z analizą pól przemieszczeń i naprężeń, a także lokalnych efektów w strefach przypodporowych. Warto podkreślić, że wyniki analiz numerycznych prezentowane w tym rozdziale, dość dobrze pokrywają się z wynikami wcześniej prezentowanych wyników laboratoryjnych, co świadczy o bardzo dobrym ich przygotowaniu i skalibrowaniu.

Ostatni rozdział pracy zawiera podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań. Autor trafnie wysuwa wnioski końcowe i udowadnia słuszność tez postawionych w rozprawie doktorskiej. Wskazuje też dalsze kierunki badań które umożliwią wyznaczanie nie tylko sztywności skrętnej ale również giętno-skrętnej.

5. Ocena merytoryczna rozprawy

W rozprawie badano dość złożone zjawiska mechaniczne, jakimi są skręcanie swobodne i skrępowane paneli warstwowych o sztywnych okładzinach i podatnym rdzeniu. Rozprawa omawia te zagadnienia w szerokim ujęciu, poczynawszy od teoretycznych podstaw skręcania belek i płyt, poprzez bardzo skrupulatnie przeprowadzone badania laboratoryjne, a skończywszy na zaawansowanych analizach numerycznych. Zatem tytuł rozprawy bardzo dobrze odzwierciedla jej treść a sama rozprawa stanowi cenne kompendium wiedzy na temat sztywności skrętnej paneli warstwowych. Na duże uznanie zasługuje ogromna staranność Autora pracy na wszystkich jej etapach i wnikliwa ocena uzyskanych wyników badań. Podjęta przez Doktoranta próba laboratoryjnego badania zachowania paneli warstwowych wymagała stworzenia specjalistycznego stanowiska badawczego.

Pod względem redakcyjnym praca została opracowana wzorowo. Podział na rozdziały jest logiczny i spójny. Autor trafnie dobiera wykaz literatury związanej z tematem pracy i dokonuje obszernego jej przeglądu w oddzielnym punkcie 'Wstępu'. Na uwagę zasługuje też klarowne podanie celów pracy i postawienie jej głównych tez: 1) możliwe jest skonstruowanie stanowiska laboratoryjnego, za pomocą którego będzie określana sztywność skrętna panelu warstwowego w próbie swobodnego skręcania elementu; 2) możliwe jest wyznaczenie prawidłowej odpowiedzi mechanicznej (pola przemieszczeń oraz rozkładu naprężeń wewnętrznych) panelu warstwowego, poddanego skręcaniu swobodnemu i skrępowanemu, za pomocą prostego modelu belkowego pod warunkiem znajomości sztywności skrętnej i giętno-skrętnej panelu; 3) odpowiednio skalibrowany bryłowo-powłokowy model numeryczny umożliwia pełne rozpoznanie lokalnych zjawisk, zachodzących w skręcanych swobodnie i skrępowanych panelach warstwowych. Najistotniejsza jest pierwsza teza o możliwości laboratoryjnego badania sztywności skrętnej paneli warstwowych, dzięki odpowiednio skonstruowanemu stanowisku badawczemu, co zostało potwierdzone licznymi doświadczeniami przeprowadzonymi w Międzyinstytutowym Laboratorium Konstrukcji Budowlanych, Instytutu Analizy Konstrukcji i Instytutu Budownictwa, Wydziału Inżynierii Lądowej i Transportu Politechniki Poznańskiej. Dwie kolejne tezy pracy, zostały również bardzo dobrze potwierdzone wynikami analitycznymi i numerycznymi.

Panele warstwowe analizowane w pracy, ze względu na duże różnice własności materiałowych rdzenia i okładzin, są dość trudne w badaniach laboratoryjnych, szczególnie dotyczących zachowania się tych paneli przy skręcaniu. Doktorant wykazał się tu dużą pomysłowością w skonstruowaniu autorskiego stanowiska badawczego i skrupulatne przeprowadzenie wielu testów doświadczalnych. Na uwagę zasługują też zaawansowane analizy numeryczne, które świadczą o bardzo dobrym przygotowaniu doktoranta w modelowaniu złożonych zjawisk mechanicznych. Przedłożona do oceny rozprawa stanowi oryginalne osiągnięcie naukowe i poszerza naszą wiedzę w zakresie zachowania paneli warstwowych pod wpływem skręcania.

Uwagi dyskusyjne i pytania

- Str. 96, akapit po równaniu (3.20): Autor pisze 'Przy określaniu wartości siły niszczącej F_u do wartości siły zapisywanej z trwającej próby, przy której próbki ulegały zniszczeniu, dodawano połowę ciężaru własnego próbki oraz połowę masy przyrządu generującego obciążenie', nie wyjaśnia jednak dlaczego akurat połowę. Ciężar własny jest obciążeniem ciągłym i założenie, że dokładnie jego połowę można przenieść na siły skupione wcale nie jest oczywiste. W tym miejscu w pracy przydałby się nieco bardziej szczegółowy komentarz, być może nawet z dodatkowym rysunkiem pokazującym odpowiedni schemat statyczny.
- Str. 102, akapit po rys. 3.43: Zdanie 'Pomierzona w laboratorium odpowiedź mechaniczna obciążonej mimośrodowo płyty warstwowej (rys. 3.43a) będzie zawierała w sobie sumę efektów pochodzących od zginania i skręcania' warto byłoby uzupełnić odpowiednim komentarzem, gdyż z zasady superpozycji możemy korzystać pod warunkiem liniowości zadania, czyli dla bardzo małych przemieszczeń, a czy takie rzeczywiście były zachowane w badaniu?
- Str. 136, 1 linia: Autor pisze 'Dla tak przygotowanego wykresu odczytano kąt pochylenia liniowej linii trendu, którego tangens równy jest wartości modułu sprężystości podłużnej badanej próbki'. Aby wyznaczyć moduł sprężystości nie musimy znać kąta nachylenia, gdyż jego tangens wyznaczyć można bezpośrednio ze stosunku pionowego i poziomego rzutu wybranego odcinka linii, co jest łatwiejsze i precyzyjniejsze do pomiaru niż mierzenie kąta.
- Str. 159, przedostatnie zdanie: 'W celu poznania mechanizmu zniszczenia poddanych skręcaniu paneli warstwowych zdecydowano się, po przeprowadzeniu dwóch prób laboratoryjnych, część paneli obciążyć dodatkowo trzeci raz, z zastosowaniem dodatkowego wysięgu na siłowniku'. A czy nie można byłoby skrócić panele, aby przy tym samym całkowitym kącie obrotu 8.53° zwiększyć kąt jednostkowy i tym samym intensywność skręcania?
- We wstępie do rozdziału 4 Autor pisze 'Dla jak najlepszego odzwierciedlenia rzeczywistej pracy skręcanych paneli warstwowych wszystkie modele numeryczne zostały wykonane jako trójwymiarowe, bryłowo-powłokowe' i jak najbardziej się z nim zgadzam, ale jestem też ciekaw czy podejmowano próby zastosowania modelu płytowego z zastosowaniem elementów płyty warstwowej, nie tyle do weryfikacji badań laboratoryjnych, bo tu ze względu na efekty lokalne model bryłowo-powłokowy jest poprawny, ale do weryfikacji poprawności teorii omawianych w rozdziale 2. Taki czysto płytowy model jest obliczeniowo

dużo mniej kosztowny a pozwalałby prawdopodobnie na dobrą weryfikację poprawności różnych teorii, gdyż w nich również pominięty jest efekt lokalnych zaburzeń.

- Przedstawiony na rys. 4.2 poziomy ogranicznik ma dość małe wymiary i nasuwa się pytanie czy w warunkach laboratoryjnych ograniczniki poziome były równie małe, bo jeśli tak to mogą powodować niepotrzebne lokalne koncentracje naprężeń. Proszę o wyjaśnienie tej kwestii.
- Str. 190. Tab. 4.1: pewną wątpliwość budzi fakt badania zmian sztywności panelu warstwowego na zmiany współczynnika Poissona w zakresie od -0.3 do 0.3. Czy rzeczywiście rdzenie wykonywane są z materiałów auksetycznych o ujemnym współczynniku Poissona? Nie ma to co prawda większego znaczenia dla prowadzonej analizy, gdyż wpływ tego parametru na sztywność panelu nie jest duża, ale można byłoby to trochę dokładniej skomentować w pracy, czy i dlaczego badanie w takim zakresie jest zasadne.
- Str. 197, rys. 4.15: pewne zaskoczenie budzi fakt, że na wykresach podano sztywności skrętne wg teorii z rozdz. 2 i wyniki laboratoryjne a pominięto sztywność uzyskaną numerycznie, tym bardziej, że wspomniany rysunek podano w rozdziale 4 dotyczącym analiz numerycznych. Proszę o wyjaśnienie tej kwestii.
- Str. 200 i 202: wyniki przedstawione na rys. 4.17c i 4.18c wyraźnie sugerują powstawanie naprężeń normalnych σ_x^f w okładzinach nawet podczas skręcania swobodnego (efekt pomijany w teoriach z rozdziału 2). Moim zdaniem wynika to wprost z faktu różnej sztywności materiałów okładzin i rdzenia, w konsekwencji na przekroju poprzecznym panelu materiały te chcą w różny sposób się deplanować. Proszę o skomentowanie tej kwestii, czy Doktorant podziela moje zdanie czy w inny sposób tłumaczy pojawienie się naprężeń normalnych w okładzinach.

Uwagi/pytania do stanowiska badawczego:

- Czy zamiast jednego siłownika można byłoby zastosować dwa? tak aby do urządzenia przykładać czystszy moment w postaci pary sił co zmniejszyłoby siły tarcia na łożysku?
- Czy nie można byłoby skonstruować odpowiednich chwyteków okładzin, co pozwoliłyby na bardziej równomierne rozłożenie naprężeń kontaktowych i mniejsze lokalne efekty zgniotu rdzenia w strefach kontaktu blach dociskowych z panelem?
- Jak widać na podstawie przeprowadzonych badań skręcania skrępowanego zastosowanie punktowych łączników w postaci prętów gwintowanych niezbyt dobrze się sprawdziło, gdyż nie zapewnia odpowiedniego ograniczenia deplanacji podporowego przekroju poprzecznego i powoduje duże lokalne koncentracje naprężeń w okładzinach. Czy technicznie jest możliwe aby na niewielkim odcinku końcowym panelu zastąpić podatny rdzeń sztywnym blokiem stalowym odpowiednio zespolonym z okładzinami? W ten sposób można byłoby uzyskać dużo lepszą blokadę deplanacji i uniknąć niekorzystnych koncentracji naprężeń w okładzinach.

6. Uwagi redakcyjne i edytorskie

Praca jest napisana wzorowo, z poprawną polszczyzną i klarownie formułowanymi myślami Autora. Praca zawiera bardzo nieliczne usterki redakcyjne, które nie mają charakteru merytorycznego i nie obniżają ogólnej oceny pracy. Zauważone usterki w tekście podaję poniżej.

- str. 30, równanie (2.22): w tekście powyżej i w równaniu 2.22 użyto różnych czcionek i z tego względu 'v' występujące w tekście i w równaniu 2.22 wyglądają jak dwie różne wielkości mechaniczne
- str. 32, ostatnia linia: '... liniowych momentów ...' – tzw. literówka gdyż powinno być '... liniowych ...'
- str. 41, zdanie pomiędzy (2.53) i (2.54): 'Użyte w równaniach (2.53) szeregi zostały przyjęte przez Seide [67] w postaci:' – tu wkradł się pewien skrót myślowy bo w (2.54) nie podaje się całych szeregów, ani nawet ich wyrazów, lecz po prostu wzorów na funkcje wagowe rozwinięcia szeregów Fouriera
- str. 43, pierwszy akapit p. 2.2.2: literówka 'Saint-Venatna' => 'Saint-Venanta'
- rys. 2.10: zwroty wektorów dot. naprężeń stycznych są przeciwne do tych przyjmowanych wg konwencji tzw. dodatnich przekrojów poprzecznych
- równanie (2.61): symbol 'e' występujący w tym równaniu nie został zdefiniowany w tekście. Jego interpretację geometryczną można odnaleźć na rys. 2.9, ale wymaga to od czytelnika uważnego prześledzenia wcześniejszej części pracy – tutaj, po równaniu 2.61 warto byłoby wspomnieć, że symbol 'e' oznacza odległość pomiędzy powierzchniami środkowymi okładzin co pokazano na rys 2.9
- str. 50, pierwsza linia p. 2.4: '... równania za pomocą, których możliwe ...' – błąd interpunkcji – powinno być : '... równania, za pomocą których możliwe ...'
- podpis do rys. 2.16 i 2.17: 'Przebieg naprężenia stycznych' => 'Przebieg naprężeń stycznych'
- formatowanie rys. 3.29 jest niefortunne, gdyż jest on podzielony na dwie strony. Podobny problem dotyczy też rys. 4.3
- równanie (3.19) jest niepotrzebnym powtórzeniem równania (3.10), do którego powinno być odwołanie
- dość słaba jakość rys. 3.39
- podpis do rys. 3.42: 'Mapa naprężeń stycznych τ_{xz}^f w beleczce warstwowej' sugeruje, że jest tu pokazana mapa naprężeń w całej belce (łącznie z okładzinami), podczas gdy przedstawiona jest mapa naprężeń jedynie w rdzeniu
- str. 110, linia 9: literówka 'wykorzystano dedykowana wkładkę' => 'wykorzystano dedykowaną wkładkę' – literówka a => ą
- str. 114, 3 linia p.3.2.2: literówka 'w opracowanych modelach numerycznym' => 'w opracowanych modelach numerycznych'
- str. 184, linia przed (4.3): dość niefortunne sformułowanie, że parametry materiałowe 'przyjęto w postaci', zamiast 'przyjęto następująco', gdyż poniżej w (4.3) mamy po prostu ustalone wartości liczbowe a nie wzory o postaci...
- str. 185, akapit po (4.4): literówka 'Okładziny paneli warstwowych został zamodelowane' => 'zostały'


7. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska rozwiązuje oryginalny problem naukowy jakim jest doświadczalne badanie sztywności skrętnej paneli warstwowych. Wyniki uzyskane w laboratorium zostały porównane z wynikami analitycznymi i numerycznymi. Dzięki temu praca ma znaczenie zarówno poznawcze jak i praktyczne i podejmuje aktualną tematykę.

Temat podjęty w pracy został wszechstronnie zbadany zarówno w doświadczeniach laboratoryjnych jak i zaawansowanych analizach numerycznych, co potwierdza duże kompetencje Autora. Doktorant zrealizował bardzo obszerny zakres badań, otrzymał oryginalne wyniki i na ich podstawie sformułował poprawne wnioski. Świadczy to o dobrym przygotowaniu i predyspozycjach Doktoranta do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych. Zawarte w ocenie uwagi mają charakter raczej dyskusyjny i nie umniejszają wartości pracy.

Uważam, że przedłożona do oceny rozprawa doktorska stanowi wartościowe osiągnięcie naukowe w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Lądowa i Transport. Ze względu na jej ponadprzeciętną wartość naukową i wzorowe opracowanie wnioskuje o jej wyróżnienie.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim, zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (art. 185-197) i wnioskuje o dopuszczenie rozprawy Pana mgr inż. Szymona Wojciechowskiego do publicznej obrony.


.....
dr hab. inż. Tomasz Sokół