

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. **Szymona Wojciechowskiego**  
pt. „**Analiza doświadczalna, numeryczna i teoretyczna skręcanych statycznie paneli  
warstwowych o sztywnych okładzinach i podatnym rdzeniu**”  
przedstawionej na Radzie Dyscypliny Inżynierii Lądowa i Transport Politechniki Poznańskiej

### **Formalna podstawa recenzji**

Recenzję opracowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynierii Lądowej i Transportu Politechniki Poznańskiej z dnia 28 czerwca 2022 w oparciu o umowę o dzieło nr 0410/2022/101 zawartej pomiędzy Politechniką Poznańską, reprezentowaną przez prof. dr hab. inż. Jacka Pielechę – Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej i Transportu, a recenzentem prof. dr hab. inż. Piotrem Lackim z Politechniki Częstochowskiej przesłanej wraz z pismem nr RD/d/14/01/2022 Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej i Transportu prof. dr hab. inż. Jacka Pielechy.

Recenzję sporządzono zgodnie z wymogami ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668, z późn. zm.)

Recenzowana praca została napisana pod kierunkiem dr hab. inż. Zbigniewa Pozorskiego prof. PP oraz promotora pomocniczego dr inż. Anny Knitter-Piętkowskiej.

### **Uwagi ogólne**

Rozwój struktur kompozytowych, do których należy zakwalifikować panele warstwowe analizowane w recenzowanej pracy, jest determinowany znajomością ich odpowiedzi mechanicznej pod zadaniem obciążeniem. Panele warstwowe nie znalazły do tej pory kompleksowego opracowania naukowego zawierającego analizę skręcania czy weryfikację teorii opartych na modelach belkowych opisujących odpowiedź mechaniczną skręcanych paneli warstwowych. W praktyce prawidłowa ocena zjawiska skręcania jest istotna dla bezpiecznego i świadomego zastosowania paneli warstwowych w przypadku występowania złożonych warunków obciążenia i podparcia. W literaturze przedmiotu pojawiają się prace naukowe dotyczące konstrukcji warstwowych w zakresie ich podstawowego zastosowania, co jest związane z dużym wzrostem zastosowania tych struktur w praktyce przemysłowej szczególnie w budownictwie. Niewiele jest prac dotyczących zjawiska skręcania paneli warstwowych, które w szczególnych przypadkach może mieć negatywne działanie.

W literaturze przedmiotu autorzy dużą uwagę przykładają do określenia właściwości mechanicznych poszczególnych składowych materiałowych analizowanych struktur kompozytowych. Na potrzeby opisu zachowania się paneli warstwowych badacze opracowują

liczne teorie i równania, które są weryfikowane poprzez badania eksperymentalne i analizy numeryczne. W literaturze przedmiotu większość teorii opisujących problem skręcania paneli warstwowych jest oparta na klasycznej teorii warstwowej z założeniem jednorodności i izotropowości materiału rdzenia i okładzin.

Jednym z istotnych wyzwań, w analizie paneli warstwowych, jest wrażliwość przyjętych warunków brzegowych podparcia i obciążenia na zachowanie skręcanego panelu warstwowego. Realizując badania laboratoryjne i analizy numeryczne należy w możliwie dokładny sposób odwzorować przypadek czystego skręcania z zapewnieniem swobody deplanacji przekroju poprzecznego na całej długości skręcanego elementu.

Z informacji zamieszczonej w pracy wynika, że została ona zrealizowana w Międzyinstytutowym Laboratorium Konstrukcji Budowlanych, Instytutu Analizy Konstrukcji i Instytutu Budownictwa. Na podkreślenie zasługuje fakt, że praca została zrealizowana przy użyciu szerokiego spektrum nowoczesnych urządzeń badawczych i technologicznych. Niektóre z zastosowanych urządzeń badawczych mają charakter unikalny (np. skonstruowane autorskie stanowisko badawcze do skręcania paneli warstwowych) i wymagały opanowania niestandardowej metodyki badawczej. Ze względu na przyjętą metodykę badań i liczbę próbek, można ocenić, że praca została wykonana przy dużym nakładzie czasu i środków finansowych.

### **Aktualność podjętego tematu**

W pracy podjęto się oceny odporności paneli warstwowych na skręcanie. Prawidłowa ocena zjawiska skręcania dla paneli warstwowych jest istotna ze względu na bezpieczeństwo ich stosowania w złożonych warunkach obciążenia i podparcia. Nie bez znaczenia jest również próba weryfikacji poprawności istniejących teorii opartych na prostych modelach belkowych, pozwalających opisać pola przemieszczeń i rozkład naprężeń wewnętrznych skręcanych paneli warstwowych.

Problemy związane z projektowaniem i opisem struktur warstwowych wymagają prowadzenia coraz bardziej zaawansowanych prac naukowych w tym zakresie. Wiadomo, że jednym z wyzwań w tym zakresie jest określenie podstawowych właściwości mechanicznych elementów paneli warstwowych. W pracy podjęto się określenia podstawowych parametrów materiałowych rdzenia i okładzin.

Biorąc pod uwagę stan wiedzy w analizowanym zakresie uważam, że **tematyka opiniowanej pracy jest celowa i aktualna z naukowego i praktycznego punktu widzenia.**

W szczególności tytuł pracy jest na odpowiednim poziomie ogólności i ma właściwe odniesienie do treści rozprawy. Sformułowanie tytułu pozwala się zorientować w zawartości merytorycznej pracy. Mocną stroną pracy jest jej badawczy charakter oraz potencjał aplikacyjny. Wyniki przedstawione w pracy mogą znaleźć zastosowanie w przemyśle budowlanym. Aktualność podejmowanej tematyki potwierdzają polskie i zagraniczne doniesienia literaturowe.

## **Zakres opiniowanej pracy**

*Struktura pracy* jest typowa dla rozpraw doktorskich, składa się z pięciu rozdziałów głównych, streszczeń w języku polskim i angielskim, wykazu ważniejszych oznaczeń, spisu literatury, rysunków tabel oraz załączników. Praca jest obszerna i liczy w sumie 297 stron. Spis literatury zawiera 83 pozycje w większości z ostatnich dziesięciu lat. Numeracja rysunków i tabel jest związana z numerem głównym rozdziału.

*Rozdział pierwszy* zawiera wstęp, sformułowanie celu i zakresu pracy oraz genezę podjęcia tematu rozprawy. Wieloaspektowe odniesienia do literatury przedmiotu w tym rozdziale wskazują na aktualne problemy związane z przypadkami skręcania paneli warstwowych. W rozdziale tym zwrócono uwagę, że tematyka skręcania konstrukcji warstwowych pojawia się w publikacjach naukowych od blisko 70 lat. W jednej z pierwszych prac naukowych z 1956 r. rozważano skręcanie prostokątnych paneli warstwowych wg. teorii de Saint-Venanta. Przegląd literatury w tym rozdziale zwraca szczególną uwagę na to, w jaki sposób autorzy określają sztywność skrętną paneli. W podsumowaniu rozdziału na podstawie doniesień literaturowych wskazano na potrzebę prowadzenia badań doświadczalnych z uwzględnieniem przyjętych warunków brzegowych podparcia oraz obciążenia. Przedstawiona analiza była podstawą sformułowania tez pracy które dotyczyły możliwości skonstruowania stanowiska laboratoryjnego, za pomocą którego określono sztywność skrętną panelu warstwowego w próbie swobodnego skręcania elementu, możliwości wyznaczenia prawidłowej odpowiedzi mechanicznej za pomocą prostego modelu belkowego oraz określenia lokalnych zjawisk zachodzących w skręcanych swobodnie i skrępowanych panelach warstwowych.

*Rozdział drugi* szerzej traktuje analityczne wyprowadzenia problemu skręcania swobodnego oraz skrępowanego, które w przypadku paneli warstwowych o sztywnych okładzinach i podatnym rdzeniu należą do zjawisk istotnych. W rozdziale tym przedstawiono chronologiczny przegląd znanych z literatury i stosowanych teorii dotyczących skręcania paneli warstwowych. Omówiono różnice i zbieżności w stosowaniu poszczególnych równań do opisu sztywności skrętnej. Z przeprowadzonego porównania teorii w zakresie sztywności skrętnej wynika, że stosunek szerokości do grubości przekroju w niektórych przypadkach wpływa na rozbieżność wyników. Rozdział opisuje również charakterystyki wycinkowe oraz naprężenia wewnętrzne paneli warstwowych. Rozbudowane zależności analityczne zestawione na jednym wykresie obrazują dużą zgodność pomiędzy wartościami naprężeń wyznaczonymi za pomocą równań zaproponowanych przez autorów analizowanych teorii.

*Rozdział trzeci* opisuje badania laboratoryjne, zastosowaną w rozprawie metodykę badawczą oraz szczegółowo przedstawia unikatowe stanowisko do badań skręcania płyt warstwowych, którego Autor rozprawy jest twórcą.

W rozdziale przedstawiono zakres przeprowadzonych badań materiałowych w skład których wchodzi określenie modułów sprężystości i ścinania dla rdzenia i okładzin. Rozdział obszernie prezentuje wizualnie i opisowo metodykę wyznaczania modułów wraz z metodologią oznaczania próbek ich nazewnictwem i sposobem wycinania próbek z materiału rodzimego. W rozdziale brakuje jednoznacznego zdefiniowania rodzaju materiału próbek. Jest wprawdzie

ogólna informacja, że badanie modułu sprężystości podłużnej okładzin zostało wykonane na próbkach wycinanych z arkuszy blach dostarczonych przez producenta płyt warstwowych. W tym konkretnym przypadku producentem blach była firma TATA Steel. Z naukowego punktu widzenia istotniejsza byłaby informacja o normowym oznaczeniu stali. Podobnie jest w przypadku materiału rdzenia. Informacje dotyczące przygotowania próbek do badań, ich wymiarach i oznaczeniach są dość szczegółowe i nie budzą moich wątpliwości. Próby wytrzymałościowe rozciągania stali, z której określano moduł sprężystości podłużnej badanych próbek, została wykonana zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2020 na maszynie wytrzymałościowej INSTRON SATEC 300 DX przy użyciu ekstensometru. Określenie modułu sprężystości rdzenia zostało wykonane zgodnie z normą PN-EN 14509:2013. Na uwagę zasługuje specjalna procedura pozwalająca uwzględnić w pomiarach podatność układu mocującego próbki. Moduł ścinania określono również na podstawie normy PN-EN 14509:2013 przy użyciu stanowiska badawczego do badania modułu ścinania. W trakcie badań zaobserwowano trzy formy zniszczenia: ścięcie rdzenia beleczki, odspojenie obciążonej okładziny od rdzenia, wgniecenie stalowej okładziny w rdzeń okładziny bez wyraźnego zniszczenia próbki. Przeprowadzona analiza wykazała, że na całkowitą wartość ugięcia największy wpływ ma efekt ścinania.

Ważną częścią tego rozdziału jest szczegółowy opis stanowiska badawczego do skręcania płyt warstwowych. Przy konstrukcji stanowiska zwrócono szczególną uwagę na zastosowanie takich warunków brzegowych podparcia i obciążenia, które najlepiej oddają warunki czystego skręcania płyty warstwowej. Zaprojektowane warunki brzegowe według mojej oceny prawidłowo odnoszą się do stosowanych w analizach teoretycznych modeli belkowych, za pomocą których odzwierciedlona jest analitycznie praca skręcanych paneli warstwowych. Stanowisko badawcze składa się z ramy podporowej która jest zamocowana do posadzki. Sztynność bloku podporowego została zwiększona za pomocą wspornikowego mocowania bloku podporowego w ramie podporowej. Jednym z najważniejszych elementów obrotowego stanowiska badawczego jest ślizgowe łożysko obrotowe. Na uwagę zasługuje fakt, że na etapie projektowania i wykonania stanowiska zwrócono uwagę na zapewnienie płynności jego pracy i minimalizacji oporów tarcia dzięki wykonaniu trzpienia i piasty łożyska z jednego pręta, precyzyjnie wykonanym powierzchniom stykowym pomiędzy trzpieniem i piastą oraz zastosowaniu dedykowanego smaru. Nie mniej uwagi poświęcono kwestiom bezpiecznej eksploatacji stanowiska badawczego projektując go tak aby w trakcie zniszczenia badanego elementu nie doszło do zagrożenia bezpieczeństwa osób przebywających w pobliżu stanowiska. Istotnym elementem opracowania stanowiska badawczego od strony naukowej była analiza tribologiczna układów trących. Autor słusznie założył, że opory tarcia będą miały wpływ na wyniki uzyskiwane przez symulator i ich minimalizacja wpłynie korzystnie na rezultaty badań. Badanie relacji trzpienia i piasty uzupełniono o analizę MES w celu oszacowania wartości oporu ruchu na łożysku obrotowym. Obliczona wartość oporu ruchu była bliska wartości wyznaczonej w warunkach rzeczywistej pracy całego stanowiska co świadczy o spójności i poprawności otrzymanych wyników. Autor określił sztywność stanowiska badawczego jako relacja siły rozpychającej belki poprzeczne do ich przemieszczenia wywołanego tą siłą. Badania kalibracyjne przeprowadzono dla przypadku skręcania belki stalowej wykonanej z rury okrągłej o znanych parametrach mechanicznych. Otrzymany w ramach

przeprowadzonych prac kalibracyjnych stanowiska poziom zgodności pomiędzy obliczeniami analitycznymi, a badaniem laboratoryjnym uznano za satysfakcjonujący. Różnica względna pomiędzy sztywnością skrętną obliczoną analitycznie a tą wyznaczoną laboratoryjnie nie przekraczała 10%.

Ostatnia część rozdziału dotyczy badania skręcania 92 próbek paneli warstwowych, które zrealizowano przyrastającym w czasie kątem obrotu stanowiska badawczego. W tej części pracy na uwagę zasługuje szczegółowy opis przeprowadzonych badań, przygotowania i oznaczenia próbek. Badania pokazały, że spadek wartości sztywności skrętnej paneli warstwowych występuje przy zmniejszeniu szerokości przekroju poprzecznego elementu. Opisana w tej części pracy metoda interpretacji wyników uzyskanych z próby skręcania paneli warstwowych z wykorzystaniem autorskiego stanowiska badawczego w celu określenia sztywności skrętnej nie budzi moich zastrzeżeń. Ponieważ parametry badania sztywności skrętnej nie powodowały zniszczenia paneli warstwowych Autor przeprowadził dodatkowe próby polegające na zwiększeniu kąta skręcania aż do zniszczenia elementu. W trakcie realizowanych prób obserwowano lokalne odspojenia pomiędzy okładzinami a rdzeniem w obrębie podpór. Na części badanych paneli warstwowych dokonano pomiaru liniowych odkształceń okładzin za pomocą elektrycznych tensometrów oporowych. Na podstawie sygnałów pomiarowych otrzymanych z poszczególnych czujników, wykorzystując prawo Hooke'a obliczono składowe płaskiego stanu naprężenia w okładzinach analizowanego panelu warstwowego. W ramach badań wykonano również próby skręcania skrępowanego paneli warstwowych. Badania te miały na celu zobrazowanie wpływu blokady deplanacji przekroju poprzecznego próbki na odpowiedź mechaniczną skręcanego elementu. Zastosowana w zrealizowanych badaniach laboratoryjnych blokada deplanacji spowodowała zmniejszenie wartości przemieszczeń wszystkich punktów, w których ustawione były indukcyjne czujniki przemieszczeń. W całym zakresie obciążenia próbki, na całym obszarze skręcanego panelu warstwowego zaobserwowano redukcję kątów obrotu skręcanych skrępowanie elementów, w odniesieniu do tych skręcanych swobodnie.

Rozdział kończy podsumowanie i komentarz do zrealizowanych badań w których Autor stwierdza, że w trakcie realizacji prób skręcania skrępowanego paneli warstwowych, pomimo zastosowania na podporze nieruchomej fizycznych łączników mechanicznych, zaobserwowano niepełną blokadę deplanacji podporowego przekroju poprzecznego. Przedstawione wyniki przemieszczeń oraz naprężeń wskazują na częściowe ograniczenie możliwości spaczenia przekroju poprzecznego panelu warstwowego.

*Rozdział czwarty* szczegółowo prezentuje wyniki analizy numerycznej w których punktem odniesienia były badania laboratoryjne. Wykonane w ramach prowadzonych prac analizy numeryczne opracowano za pomocą programu SIMULIA ABAQUS. W pracy zaprezentowano trzy modele numeryczne skręcania wykonane jako trójwymiarowe, bryłowo-powłokowe. Autor dokonał odpowiedniego wyboru rozmiaru siatki oraz typu zastosowanych w analizach elementów skończonych. Rdzeń paneli warstwowych zamodelowano za pomocą ośmiowęzłowych, bryłowych elementów skończonych C3D8, z ośmioma punktami całkowania wewnątrz elementu. Okładziny paneli warstwowych zamodelowano za pomocą czterowęzłowych, powłokowych elementów skończonych S4, z czterema punktami całkowania wewnątrz elementu. Podstawowy rozmiar siatki elementów skończonych modelowanych paneli warstwowych zarówno dla powłokowych elementów okładzin, jak i bryłowych elementów rdzenia przyjęto równy 15 mm.

Elementy podporowe wykonano w formie zamkniętej ramy obejmującej podporowy przekrój poprzeczny panelu warstwowego na długości 100 mm. Każdej podporze Autor przypisał indywidualne warunki brzegowe polegające na blokadzie odpowiednich stopni swobody. Rdzeń paneli warstwowych zamodelował za pomocą ortotropowego modelu materiału w zakresie liniowo – sprężystym. Okładziny paneli warstwowych zostały zamodelowane za pomocą jednorodnego, izotropowego, sprężysto-plastycznego modelu materiału. Dane materiałowe Autor przyjął na podstawie badań laboratoryjnych. W modelach numerycznych zastosowano dwa główne rodzaje interakcji pomiędzy poszczególnymi elementami modelu. W przypadku wzajemności odkształceń stykających się ze sobą elementów wykorzystano dostępną w oprogramowaniu ABAQUS funkcję TIE. W przypadku styku dwóch powierzchni, wobec których nie można założyć równości aktywnych stopni swobody sąsiednich węzłów Autor zastosował połączenie kontaktowe SURFACE TO SURFACE, z odpowiednio zdefiniowanymi parametrami kontaktu. W przypadku gdy powierzchnie kontaktowe stykają się, każdy nacisk styku może być przenoszony między nimi. Powierzchnie kontaktowe mogą się rozdzielić, gdy nacisk styku zmniejsza się do zera. Definicja pracy połączenia w kierunku stycznym do powierzchni styku opierała się na stałej wartości przyjętego współczynnika tarcia. Wartość współczynnika uzależniono od rodzaju stykających się ze sobą powierzchni. Wartości dobranych współczynników nie budzą moich zastrzeżeń. W przypadku obciążenia Autor zdecydował się na zadaniu skupionego momentu skręcającego punkcie referencyjnym ruchomej podpory obrotowej i przekazywaniu go na skręcany element poprzez sztywną ramę podporową, w dziesięciu przyrostowych krokach.

Autor przeprowadził analizę zbieżności w której określił, które parametry mają istotny wpływ na wyniki. Na podstawie przeprowadzonej analizy wykazano, że parametrem, który silnie wpływa na wyznaczone wartości sztywności skrętnych jest moduł ścinania rdzenia  $G_{zx}^c$  panelu warstwowego. Autor stwierdził że zmiana jego wartości o 25% powoduje zmianę sztywności skrętnej o ponad 20%. Zależność ta jest widoczna zarówno wraz ze zmniejszaniem wartości modułu ścinania, jak i wzrostem jego wartości. Pozostałe analizowane parametry rdzenia nie wpływają w istotny sposób na zmiany wyznaczanych sztywności skrętnych. W zauważalny sposób na zachowanie skręcanych paneli warstwowych wpływa modyfikacja parametrów materiałowych okładzin. Zmiana wartości modułu sprężystości podłużnej o 15% powoduje zmianę sztywności skrętnej o około 3%. W przypadku analizy wpływu rozmiaru siatki MES na zbieżność wyników skręcanych paneli warstwowych, Autor stwierdził, że przyjęty zakres rozmiaru siatki MES nie wykazuje wyraźnych różnic pomiędzy wartościami przemieszczeń i naprężeń odczytanymi z opracowanych modeli numerycznych.

Badania sztywności skrętnej zaprezentowane w tym rozdziale przez Autora pokazały, że jest duża zgodność wykonanych analiz numerycznych z rzeczywistym badaniem laboratoryjnym. Sztywności skrętne panelu warstwowego wyznaczone laboratoryjnie i numerycznie osiągają podobne wartości i są o około 15% większe, niż sztywności skrętne wyznaczone analitycznie zgodnie z metodologiami Stamm'a i Witte'a oraz Seide. Otrzymane z analiz numerycznych i badań laboratoryjnych wyniki są także o ponad 30% wyższe, niż wyniki otrzymane z obliczeń analitycznych, stosując równanie zaproponowane przez Höglunda. Podobne wnioski Autor wyciągnął dla pozostałych serii próbek. W zakresie określenia naprężeń stycznych wyznaczone analitycznie wartości pozostają w bardzo dużej zgodności z wynikami analiz numerycznych na przeważającej długości analizowanej próbki. Tylko na odcinkach przypodporowych, w odległościach do 500 mm od podpór, zaobserwować

można rozbieżność pomiędzy wyznaczonymi wartościami naprężeń. Autor w tej części pracy odnosi się do szerokiego porównania różnych rodzajów naprężeń ze zwróceniem uwagi na aspekty lokalne występujące podczas skręcania paneli. Autor pokazuje jak w miejscach kontaktu następuje silny wzrost wartości naprężeń wypadkowych w okładzinach oraz ich uplastycznienie i utrata płaskiego kształtu. W dalszej kolejności następuje stopniowe wgniatanie poziomych ograniczników w głąb panelu warstwowego. Deformacje te są efektem silnie lokalnym, pokazują przede wszystkim jak bardzo wrażliwe na tego typu koncentrację naprężeń są cienkie okładziny paneli warstwowych. Na dowód prezentowane są wizualizacje numeryczne i doświadczalne.

W przypadku skręcania skrępowanego Autor napotkał na problem związany z otworami. W okolicy otworów montażowych, w cienkich okładzinach paneli warstwowych bardzo szybko dochodzi do osiągnięcia wartości naprężeń wypadkowych na poziomie granicy plastyczności materiału, z którego okładziny są wykonane. Efektem tego było lokalne uplastycznienie okładzin oraz ich deformacja. To z kolei przełożyło się na zmniejszenie blokady deplanacji spowodowane powstającymi luzami w obrębie punktowego mocowania.

*Rozdział piąty* zawiera podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań oraz syntezę dyskusji wyników badawczych. W podsumowaniu Autor odnosi się do literatury przedmiotu oraz podkreśla znaczenie badań wykonanych za pomocą opracowanego stanowiska badawczego, na które zostało złożone zgłoszenie do Urzędu Patentowego RP o udzielenie patentu na wynalazek. Na tym tle przedstawia korzyści płynące z badań przy użyciu tego autorskiego stanowiska badawczego.

Rozdział zawiera również czternaście syntetycznych wniosków szczegółowych podsumowujących pracę. Wnioski zawierają informacje z przeprowadzonych badań i odnoszą się ilościowo do wybranych i opracowanych wyników badawczych. Z przedstawionych wniosków wynika między innymi, że proces produkcji paneli warstwowych wpływa na ich właściwości mechaniczne.

Po przedstawieniu i skomentowaniu wyników badań eksperymentalnych i numerycznych Autor odnosi się do postawionych tez które w mojej opinii zostały dowiedzione.

Rozdział kończy informacja o perspektywach prowadzenia dalszych badań przy użyciu zaproponowanej metodologii. W szczególności w ramach dalszych prac dotyczących podjętego w rozprawie tematu skręcania paneli warstwowych planowana jest modyfikacja warunków brzegowych podparcia panelu warstwowego na podporze, na której blokowana jest deplanacja przekroju poprzecznego. Dzięki wprowadzonej modyfikacji oraz zrealizowaniu podobnego programu badań możliwe będzie wyznaczenie sztywności giętno-skrętnej paneli warstwowych. Badania te mogłyby laboratoryjnie potwierdzić wykonaną w rozprawie za pomocą analiz numerycznych weryfikację obliczeń analitycznych. Planowane jest również opracowanie modelu połączenia podatnego powodującego częściową blokadę deplanacji przekroju podporowego. Model ten umożliwiłby nie tylko globalną weryfikację stanu granicznego nośności i użyteczności paneli warstwowych, ale także uzyskanie odpowiedzi na lokalne postacie zniszczenia okładzin w obrębie ich kontaktu z łącznikami.

Autor podaje również propozycje badań ukierunkowanych na wykorzystanie uniwersalności autorskiego stanowiska badawczego polegającej na możliwości badania paneli warstwowych o różnej budowie przekroju poprzecznego planowane są badania laboratoryjne złożonych układów warstwowych. Planowane są prace dotycząc wyznaczenia sztywności skrętnej paneli warstwowych o okładzinach mikroprofilowanych i wysokoprofilowanych oraz dla paneli o rdzeniach wykonanych z materiałów o nieciągłej budowie strukturalnej takich jak wełna mineralna, rdzenie typu plaster miodu czy rdzenie wielowarstwowe.

Pracę kończy przegląd literatury zawierający sześć pozycji norm i osiemdziesiąt trzy pozycje literaturowe. W dalszej części znajduje się spis rysunków dla każdego rozdziału co ułatwia orientację w pracy, spis tabel oraz załączniki zawierające szczegółowe wyniki ze zrealizowanych badań.

### **Uwagi redakcyjne**

- *Ogólna uwaga.* W pracy nie napotkano nazwy normowej/handlowej stali przeznaczonej na okładziny paneli warstwowych.
- *Ogólna uwaga.* W pracy na niektórych rysunkach z analizy numerycznej nie podano jednostek prezentowanych wartości (np. Rysunek 4.10; 4.19; 4.20; 4.21; 4.22; 4.28)
- *Str. 48* Niejasne sformułowanie: „*Relacja modułu sprężystości podłużnej .... 50 000*”

### **Uwagi dyskusyjne**

- Jakie jest normowe oznaczenie stali użytej na okładziny?
- Jaki rodzaj pianki PIR zastosowano w badaniach i jak ten materiał może wpływać na właściwości paneli warstwowych w zakresie niskich i wysokich temperatur oraz w dłuższym czasie eksploatacji.
- W jaki sposób dobrano zakres rozmiaru siatki MES do analizy wrażliwości?. Jeśli w przedziale wielkości elementu 15mm – 40mm nie zaobserwowano istotnej różnicy to może można było przyjąć większe elementy?



## Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska prezentuje udane wieloaspektowe podejście do oceny paneli warstwowych poddanych skręcaniu oraz weryfikacja poprawności istniejących teorii opartych na prostych modelach belkowych (jednowymiarowych) opisujących odpowiedź mechaniczną skręcanych paneli warstwowych.

Postawione na początku rozprawy doktorskiej kluczowe pytania stanowią niejako strategię rozwiązania problemu. Autor konsekwentnie rozwiązuje postawione sobie problemy i odpowiednio dokumentuje je w rozprawie.

Skręcanie paneli warstwowych jest zjawiskiem znanym w praktyce inżynierskiej jednak stosowane modele obliczeniowe nie są wystarczające. W praktyce projektowania obiektów przemysłowych z wykorzystaniem paneli warstwowych, stosuje się wiele uproszczeń. Dlatego prawidłowa ocena zjawiska skręcania jest istotna dla bezpiecznego i świadomego zastosowania paneli warstwowych w przypadku występowania złożonych warunków obciążenia i podparcia. Możliwość zwiększenia dokładności obliczeń w praktyce stanowi dobre uzasadnienie badań podjętych przez Doktoranta. Postawione zadanie ma w pełni aplikacyjny charakter, a rezultaty pracy mogą stanowić podstawę do dalszych badań. **Zaprezentowane w pracy wyniki badań, w pełni uzasadniają przyjęty temat rozprawy doktorskiej: „Analiza doświadczalna, numeryczna i teoretyczna skręcanych statycznie paneli warstwowych o sztywnych okładzinach i podatnym rdzeniu”**

Przedstawione przez Doktoranta dane literaturowe dotyczą bezpośrednio problematyki rozważanej w pracy, umożliwiają ocenę aspektów poznawczych i naukowych pracy. Cytowane prace są aktualne i dobrze dobrane, w dużej części są to publikacje z renomowanych czasopism. Gruntowna krytyczna analiza stanu zagadnienia wskazuje na pewne ograniczenia w stosowaniu znanych z literatury teorii opisujących zachowanie paneli warstwowych poddanych obciążeniom skręcającym. Doktorant właściwie analizuje poszczególne przypadki obciążeń skręcających ze złożonymi warunkami brzegowymi.

Rzetelny przegląd literatury był podstawą zdefiniowania celu i zakresu pracy. Tezy pracy zakładały możliwość skonstruowania stanowiska laboratoryjnego, za pomocą którego będzie określana sztywność skrętna panelu warstwowego w próbie swobodnego skręcania elementu. Tezy pracy zakładały również 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 oraz zbudowanie modelu numerycznego umożliwiającego pełne rozpoznanie lokalnych zjawisk, zachodzących w skręcanych swobodnie i skrępowanie panelach warstwowych.

Do wykazania słuszności sformułowanej tezy przyjęto odpowiedni program realizacji pracy doktorskiej zakładający osiągnięcie głównych celów pracy.

**Postawiony cel pracy uważam za osiągnięty, założony zakres pracy za zrealizowany a tezę pracy za udowodnioną i udokumentowaną.**

Procedury badawcze opisane w rozdziale dotyczącym metodyki badań są w większości standardowe lub znormalizowane i przyjęte w pracy zgodnie z ich przeznaczeniem. Niestandardowym i zarazem ciekawym urządzeniem badawczym jest autorskie stanowisko do badania skręcania. Wyniki badań nie budzą moich zastrzeżeń, a ich opis i dyskusja świadczy o znajomości poruszanego problemu.

Praca jest napisana starannie, czytelnie i wyczerpująco. Przedstawia zagadnienie badawcze zarówno od strony sformułowanych treści jak i formy rozprawy. Struktura rozprawy jest prawidłowa. W rozprawie nie ustrzeżono się drobnych błędów edytorskich, nie wpływających na czytelność i przejrzystość pracy.

### **Wniosek końcowy**

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Szymona Wojciechowskiego pt. „**Analiza doświadczalna, numeryczna i teoretyczna skręcanych statycznie paneli warstwowych o sztywnych okładzinach i podatnym rdzeniu**” stanowi istotny wkład w rozwój wiedzy w zakresie Inżynierii Lądowej i Transportu.

Autor osiągnął założony cel wykazując się znajomością zagadnień z zakresu Inżynierii Lądowej i Transportu, oraz nowoczesnej metodyki i technik badawczych. Zaprezentował oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. **Wnioski wynikające z rozprawy stanowią oryginalny wkład naukowy autora w rozwój dyscypliny naukowej Inżynierii Lądowej i Transportu.**

**W mojej ocenie przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Szymona Wojciechowskiego w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668, z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

Biorąc pod uwagę kompleksowe podejście do rozwiązania postawionego w pracy problemu, dużą oryginalność zastosowanej metodyki badań skręcanych statycznie paneli warstwowych oraz własny wkład Autora w rozwiązanie konstrukcji stanowiska badawczego do skręcania paneli warstwowych **stawiam wniosek o wyróżnienie pracy nagrodą.**



.....  
Prof. dr hab. inż. Piotr LACKI  
Politechnika Częstochowska  
Częstochowa, 1.09.2022