

Dr hab. inż. Paweł Kossakowski, prof. uczelni  
Wydział Budownictwa i Architektury  
Politechnika Świętokrzyska  
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7  
25-314 Kielce

Kielce, 27 stycznia 2021 r.

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

mgr inż. Bartosza Kaweckiego

pt. „Dobór parametrów modeli obliczeniowych pełnych dźwigarów z kompozytów drewno-polimerowych zbrojonych włóknami”

### **1. Podstawy formalne opracowania recenzji**

Podstawą do wykonania recenzji jest Uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej z dnia 18 listopada 2020 r., zgodnie z którą powołano recenzentów w przedmiotowym przewodzie doktorskim. Pismo z informacją w tej sprawie wystosował w dniu 4 grudnia 2020 r. Przewodniczący ww. Rady Profesor dr hab. inż. Wojciech Franus.

### **2. Przedmiot recenzji**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Kaweckiego pt. „Dobór parametrów modeli obliczeniowych pełnych dźwigarów z kompozytów drewno-polimerowych zbrojonych włóknami”. Praca została opublikowana w formie manuskryptu na Wydziale Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej w roku 2020. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Jerzy Podgórski, prof. uczelni.

Dysertacja liczy 135 stron, składa się ze streszczeń w j. polskim i angielskim, wykazów najważniejszych symboli, oznaczeń i akronimów, wstępu, 7 rozdziałów zasadniczych oraz bibliografii zawierającej 135 pozycji literaturowych.

### **3. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Tematyka rozprawy obejmuje zagadnienia modelowania dźwigarów kompozytowych drewniano-polimerowych zbrojonych włóknami w zakresie analizy nieliniowej.

Podstawowym celem recenzowanej pracy było opracowanie rozwiązań umożliwiających stworzenie modeli teoretycznych i procedur, które pozwalałyby na opis i numeryczną symulację pracy drewnianych dźwigarów pełnościennych zbrojonych kompozytem CFRP. Tak zdefiniowany problem naukowy określił zakres przeprowadzonych badań, które obejmowały eksperymenty wykonane na próbkach i elementach w skali technicznej oraz koncepcję, walidację i finalnie propozycję modeli obliczeniowych opisujących pracę statyczną badanych dźwigarów w zakresie nieliniowym oraz procedury numerycznego symulowania tego typu zjawisk.

Wstęp do rozprawy zawiera trzy podrozdziały, w których dokonano wprowadzenia do przedmiotowej tematyki, zdefiniowano problem naukowy oraz określono zakres pracy.

Problem naukowy został określony jako *opisanie zjawisk fizycznych zachodzących w pełnych dźwigarach wykonanych z kompozytów drewno-polimerowych zbrojonych włóknami oraz dobór parametrów modeli obliczeniowych umożliwiającą ich analizę.*

W pracy wyznaczono cztery główne cele naukowe:

- 1) *określenie właściwego sposobu modelowania drewna przy zginaniu w zakresie liniowo-sprężystym oraz jego zniszczenia,*
- 2) *szczegółowa analiza pracy spoin klejowych, wykonywanych pomiędzy drewnem oraz pomiędzy drewnem a polimerem zbrojonym włóknami w zakresie sprężystym oraz poza-sprężystym,*
- 3) *określenie wpływu połączeń klejonych na pracę statyczną dźwigarów pełnych wykonanych z kompozytu,*
- 4) *stworzenie wytycznych dotyczących doboru parametrów modeli obliczeniowych pełnych dźwigarów kompozytowych.*

W rozprawie nie postawiono tez, które zostałyby w niej udowodnione, prawdopodobnie z uwagi na specyfikę podjętego problemu naukowego oraz postawionych celów naukowych.

W drugim rozdziale dokonano przeglądu literatury przedmiotowej, omawiając zagadnienia modelowania drewna, badania połączeń klejonych w kompozytach zawierających drewno i wzmacnianie dźwigarów wykonanych z drewna i materiałów drewnopochodnych.

Rozdział trzeci obejmuje badania i modelowanie lamel drewnianych poddanych zginaniu. Przedstawiono w nim założenia przyjęte w badaniach, opisano zastosowane modele materiałowe oraz zamieszczono i przedyskutowano wyniki badań parametrów sprężystych i wytrzymałościowych lamel drewnianych. W ostatniej części rozdziału dokonano doboru finalnych wartości parametrów mechanicznych badanego materiału oraz określono parametry modelu Hilla. Opierając się na metodzie elementów skończonych przyjęto również metodologię numerycznego modelowania lamel drewnianych w środowisku Abaqus. Zaproponowano optymalne typy i rozmiary elementów skończonych, które zastosowano w trójwymiarowym modelu obliczeniowym. Za jego pomocą dokonano numerycznej weryfikacji badań eksperymentalnych, uzyskując wysoką zbieżność wyników w zakresie symulacji ścieżek równowagi.

W kolejnym rozdziale omówiono zasady analizowania połączeń klejonych, skupiając się na modelach stosowanych do opisu zjawiska delaminacji połączeń oraz zależnościach i parametrach definiujących elementy kohezyjne.

Badania i modelowanie połączeń klejonych to tematyka rozdziału piątego. Przeanalizowano w nim dwa rodzaje połączeń, typu drewno-drewno i drewno-CFRP. Analizę obu typów złączy przeprowadzono w identycznym układzie, obejmującym badania sztywności w zakresie liniowo-sprężystym, opracowanie modeli MES, identyfikację i opis delaminacji połączeń oraz mechanizmów zniszczenia.

Rozdział szósty poświęcono badaniom i modelowaniu pracy dźwigarów pełnowymiarowych. Tytułem wprowadzenia omówiono aspekty technologiczne produkcji elementów z drewna klejonego. Opisano przeprowadzone badania laboratoryjne, skupiając się na elementach badawczych oraz procedurze eksperymentalnej. W kolej-

nej, zasadniczej części tego rozdziału przeanalizowano wyniki wykonanych badań laboratoryjnych oraz ich modelowania za pomocą MES w programie Abaqus. Szczegółowej analizie poddano taśmę CFRP, sztywność liniowo-sprężystą belek, ich pracę sprężysto-plastyczną, zasady określania siły maksymalnej, identyfikację zniszczenia belek w oparciu o metodę DIC i zdjęcia oraz delaminację połączeń klejonych.

W rozdziale siódmym przedstawiono opracowane uproszczone modele obliczeniowe analizowanych elementów. Podzielono go na dwie części, omawiając modele MES dla belek wyższych oraz stosowane formuły, rozpatrując współczynnik sztywności kohezijnej spoin, obliczenia siły maksymalnej, naprężenia w taśmach CFRP oraz wpływ modułów sprężystości.

Ostatni rozdział pracy to podsumowanie uzyskanych wyników i wnioski ogólne.

Na końcu rozprawy zamieszczono wykaz bibliografii, którą w niej wykorzystano.

#### **4. Ocena trafności wyboru tematyki**

Zagadnienie modelowania pracy ustrojów nośnych jak i poszczególnych ich części, tj. elementów konstrukcyjnych, połączeń etc., jest zagadnieniem podstawowym z punktu widzenia teorii konstrukcji, co historycznie rzecz biorąc stworzyło podwaliny projektowania konstrukcji budowlanych. Od wielu już dziesięcioleci opracowane modele obliczeniowe umożliwiają wykonywanie obliczeń inżynierskich komputerowo, przy wykorzystaniu metod numerycznych. Są one podstawą nowoczesnych programów wspomagających projektowanie inżynierskie. W dobie dynamicznego rozwoju tego typu aplikacji, będących często składnikami wysoce skomplikowanych i zaawansowanych środowisk obliczeniowych, pojawiają się możliwości coraz szerszego zastosowania zaawansowanych modeli obliczeniowych do symulacji pracy konstrukcji, analizy szerokiego spektrum materiałów, a nawet modelowania zjawisk fizycznych czy całych ciągów procesów technologicznych.

Tak naprawdę kierunek został wytyczony już dawno. W wielu dziedzinach stopniowo odchodzi się od badań eksperymentalnych, szczególnie w przypadkach trudnych, na rzecz symulacji komputerowych, które obecnie coraz wierniej odzwierciedlają badane zjawiska. Często obliczenia komputerowe są również nieporównywalnie tańsze. Tym samym konieczność ciągłego opracowywania i korekty modeli teoretycznych jest wciąż aktualna z uwagi na stosowanie coraz bardziej skomplikowanych elementów konstrukcyjnych i materiałów nowej generacji.

Obecnie dotyczy to przede wszystkim kompozytów, które są tak naprawdę przyszłością inżynierii i to nie tylko budowlanej. Podstawową trudnością jest prawidłowe odzwierciedlenie pracy tego typu materiałów z uwagi na ich budowę i zachowanie w trakcie procesu deformacji i niszczenia. Jak trudną jest kwestia prawidłowego opisu pracy złożonego, nieizotropowego materiału, wystarczy choćby przykład klasycznego już żelbetu, gdzie poszczególne fazy deformacji i niszczenia zostały dokładnie zbadane i opisane. Choć opracowano teoretyczne modele niszczenia żelbetu, które znajdują zastosowanie w symulacjach komputerowych, to długa jest jeszcze droga do opracowania uniwersalnego, prostego i rzeczywistego modelu obliczeniowego, który byłby powszechnie używany w programach wspomagających projektowanie inżynierskie.

Coraz szersze rozpowszechnienie w szeroko traktowanej technice nowoczesnych kompozytów narzuca naturalną konieczność ich badania, ale także ciągłego opracowywania modeli teoretycznych, za pomocą których symulowana może być ich praca. W budownictwie kwestie te zaczynają być coraz bardziej newralgiczne z uwagi na za-

stosowanie kompozytów włóknistych jako jednych z podstawowych materiałów konstrukcyjnych do wzmacniania i napraw konstrukcji istniejących, ale także powoli stających się materiałami konstrukcyjnymi, z których wykonuje się główne ustroje nośne, takie jak choćby mosty. W odniesieniu do konstrukcji istniejących, kompozyty włókniste są stosowane przede wszystkim do wzmacniania elementów żelbetowych i drewnianych, które dzięki zastosowaniu w nich np. lamel czy mat, diametralnie poprawiają parametry wytrzymałościowo-sprężyste materiału wzmacnianego. Przekłada się to w naturalny sposób na podwyższenie nośności konstrukcji. Jeśli chodzi o drewno i materiały drewnopochodne podstawowym problemem związanym z możliwościami ich wzmacniania jest niejednorodność struktury (specyficzna budowa wewnętrzna) powodująca podatność na wiele rodzajów uszkodzeń. Jednocześnie anizotropia kompozytów wzmacniających to dodatkowa komplikacja z punktu widzenia modelu obliczeniowego. Kolejnym wyzwaniem jest modelowanie pracy materiałów hybrydowych drewno-kompozyt włóknisty w zakresie pozasprężystym, gdzie dochodzi do skomplikowanych i złożonych mechanizmów zniszczenia. Generalnie jest to zagadnienie dość trudne, stanowiące obecnie nie lada wyzwanie. Dodatkowym czynnikiem utrudniającym opracowanie modeli quasi-universalnych są znaczne naturalne rozrzuty wyników badań wytrzymałościowych drewna spowodowane wspomnianą już niejednorodnością jego budowy wewnętrznej.

Na tym tle bardzo pozytywnie należy ocenić trafność doboru tematyki badań podjętej przez mgr inż. Bartosza Kaweckiego. Zakres, cel i przede wszystkim problem badawczy określony przez niego w rozprawie idealnie wpisują się w aktualny nurt prac prowadzonych obecnie na całym świecie, dostosowując się do potrzeb opisanych szeroko powyżej. Uzyskane wyniki i propozycja modeli obliczeniowych na pewno stanowią cenny wkład w rozwój teorii mechaniki materiałów kompozytowych drewno-CFRP i optymalizacji dźwigarów z nich wykonanych.

## **5. Ocena merytoryczna pracy**

Dokonując całościowego osądu recenzowanej rozprawy, należy ją ocenić wysoko z uwagi na podjętą tematykę, przyjętą koncepcję i realizację badań oraz uzyskane wyniki.

Omawiając pod tym kątem poszczególne elementy pracy należy przede wszystkim rozpocząć od pozytywnej oceny dokonanej przez mgr inż. Bartosza Kaweckiego przeglądu literatury i dobrego rozpoznania przedmiotowej problematyki. Pozwoliło to na trafne i przemyślane określenie zakresu i celu badań. W swych studiach Autor oparł się na aktualnej literaturze dotyczącej głównie tematyki wzmacniania (zbrojenia) elementów drewnianych oraz kwestii materiałowych z tym związanych, pod kątem możliwości rozwiązywania problemów napotykanych podczas modelowania ich pracy statycznej. Przytoczył obszerne informacje literaturowe w tym zakresie, traktując przedmiotowe zagadnienie w sposób kompleksowy i interdyscyplinarny, wykraczający poza zakres standardowych prób wytrzymałościowych przeprowadzanych na elementach wzmacnianych na różne sposoby. Bardzo istotna jest tutaj kwestia analizy i modelowania połączeń drewno-materiał wzmacniający z punktu widzenia nośności elementów, w których one występują. Kluczowe są tutaj mechanizmy zniszczenia, obserwowane w przypadkach stosowania różnego rodzaju materiałów i technologii wzmacniania. Na tle przedstawionego aktualnego stanu wiedzy dotyczącego pracy statycznej drewnianych elementów konstrukcyjnych poddanych wzmacnianiu jasno zarysowuje się konieczność poszerzenia stanu wiedzy właśnie o modele obliczeniowe pozwalające na symulowanie ich pracy, co zostało wpisane w zakres określony w pracy.

W konsekwencji Autor dokonał wyboru konkretnego typu elementów konstrukcyjnych w postaci dźwigarów z drewna klejonego wzmacnianych (zbrojonych) materiałami CFRP jako głównego przedmiotu badań. Podstawowym celem było opracowanie procedury numerycznego modelowania pracy statycznej tego typu elementów. Tak określony ogólny zakres prac pozwolił na rozszerzenie stanu wiedzy w zakresie modelowania i projektowania dźwigarów będących przedmiotem badań, co poza wartością poznawczą charakteryzuje się bardzo istotnym walorem aplikacyjnym.

Zasadnicza część prac wykonanych przez mgr inż. Bartosza Kaweckiego obejmowała badania eksperymentalne, symulacje numeryczne i analizy mające na celu opracowanie modeli obliczeniowych. Dzięki kompleksowemu podejściu możliwe było szerokie i dogłębne potraktowanie podjętego w rozprawie tematu oraz uzyskanie wielu istotnych i wartościowych rezultatów, które zostały poddane walidacji i weryfikacji.

Badania eksperymentalne to jedna z głównych części wykonanych prac. Obejmowały dwie zasadnicze grupy tematyczne i trzy etapy. W pierwszej grupie analizowano próbki modelujące połączenia. Uzyskane wyniki były niezbędne do określenia charakterystyk materiałowych, weryfikacji i przyjęcia odpowiednich modeli kohezyjnych połączeń materiałów, występujących w badanych dźwigarach. W drugiej grupie analizowano elementy belkowe – lamele i dźwigary w skali technicznej, a przedmiotem analizy była ich praca statyczna. Pozwoliło to na weryfikację i opracowanie procedury prowadzenia obliczeń i doboru modeli numerycznych. Pierwszy zakres badań eksperymentalnych obejmował analizę pracy elementów w stali technicznej w postaci 8 próbek lamel drewnianych, celem wyznaczenia stałych sprężystych i wytrzymałościowych materiału drzewnego. Uzyskane wyniki posłużyły do definicji modelu materiałowego drewna. Kolejny etap eksperymentów obejmował badania dwóch grup modeli połączeń drewno-drewno i drewno-CFRP, stosując odpowiednio po 20 i 18 próbek. Uzyskane wyniki posłużyły do opracowania i przyjęcia modelu kohezyjnego analizowanych połączeń. Ostatni etap prac to badania na elementach w skali technicznej, gdzie przeanalizowano 3 różne zestawy po 7 dźwigarów drewnianych wzmocnionych materiałami CFRP w różnej konfiguracji. I tak badaniom poddano dźwigary z czystego drewna klejonego (typu B), z pojedynczą wkładką CFRP (typu BW) i wkładką podwójną CFRP (typu BWW). Analiza ich pracy statycznej pozwoliła na opracowanie i weryfikację finalnej procedury modelowania i doboru modeli numerycznych w symulacjach komputerowych.

Należy ogólnie podkreślić, że program badań został zaplanowany w sposób poprawny i przemyślany. Przytoczone powyżej liczby próbek i elementów w poszczególnych grupach były znaczne i wystarczające do uzyskania rezultatów ważnych statycznie. Wyniki są więc miarodajne z uwagi na odpowiednią liczbę zbadanych próbek i elementów, a obserwowane rozrzuty typowe dla badań materiałów i elementów drewnianych. Wystarczy przywołać maksymalne odchylenie standardowe na poziomie 37% obserwowane w badaniach sztywności liniowo-sprężystej połączeń drewno-CFRP, podczas gdy średnia niepewność wyników badań dźwigarów pełnościennych definiowana również odchyleniem standardowym wyniosła zaledwie 7%. Część eksperymentalna obejmowała badania dźwigarów w skali technicznej, co pozwoliło na uzyskanie wyników, które można bezpośrednio odnosić do elementów w skali pełnogabarytowej w zakresie analizy jakościowej. To istotne z naukowego, ale i praktycznego punktu widzenia, gdyż pozwala na odnoszenie uzyskanych rezultatów do rzeczywistych dźwigarów drewnianych poddawanych wzmacnianiu materiałami GFRP. Tym samym można stwierdzić, że rozprawa charakteryzuje się wysokim walorem aplikacyjnym. Wyniki uzyskane w opisanych powyżej eksperymentach zostały poddane szczegółowej analizie. Pozwoliła ona na zbadanie ścieżek równowagi w relacji siła-

przemieszczenie dla sprężystego i pozasprężystego zakresu pracy materiału, obejmując początkową fazę uplastycznienia drewna, i była prowadzona aż do momentu zniszczenia elementów. Pozwoliło to na bezpośrednie określenie obciążenia niszczącego definiującego tym samym nośność graniczną badanych dźwigarów.

Druga część badań, która de facto wykonywana była równolegle i powiązaniu z eksperymentami, obejmowała modelowanie numeryczne. W pracy oparto się na metodzie elementów skończonych, a symulacje przeprowadzono w środowisku Abaqus. W tym zakresie dokonano numerycznej weryfikacji przyjętego modelu materiałowego, pracy połączeń drewno-drewno i drewno-CFRP oraz finalnie pracy statycznej dźwigarów drewnianych wzmocnianych materiałami CFRP. Należy zauważyć i pozytywnie ocenić dobrą zgodność wyników modelowania numerycznego i badań eksperymentalnych we wszystkich analizowanych przypadkach. Zgodność ta obejmuje zarówno rezultaty jakościowe dotyczące zachowania się analizowanego materiału, jak i próbek i elementów w czasie ich deformacji, w tym zachodzące procesy niszczenia, a także rezultaty ilościowe obejmujące przede wszystkim ścieżki równowagi statycznej siła-przemieszczenie. Ta zgodność jest szczególnie istotna w kontekście wysokiej niejednorodności budowy drewna, która naturalnie powoduje znaczne rozrzuty wyników. Dodatkowym czynnikiem komplikującym z jednej strony przyjęcie odpowiedniego modelu materiałowego jest także ortotropia kompozytu CFRP, z drugiej jednak strony prawidłowe jej zdefiniowanie pozwala wierniej odzwierciedlić pracę skomplikowanego materiału jakim jest hybryda drewno-CFRP.

Ostatni element zrealizowanych prac to analiza uzyskanych wyników oraz opracowanie metodologii modelowania numerycznego pracy statycznej badanych dźwigarów, w tym propozycja modeli przestrzennych MES i analitycznych modeli uproszczonych.

Przechodząc do oceny przeprowadzonych prac i analiz trzeba przede wszystkim pochwalić mgr inż. Bartosza Kaweckiego za przyjęcie metodyki badań, w których w szerokim zakresie sprzężono badania eksperymentalne z symulacjami numerycznymi. Na pozytywną ocenę zasługuje tu próba wyznaczenia właściwości badanych materiałów oraz parametrów charakteryzujących połączenia, jak również zbadanie zachowania badanych próbek i elementów w sposób eksperymentalny. Próba w mojej ocenie udana. W ten sposób oparto opracowaną procedurę i przyjęte modele obliczeniowe o rzeczywiste cechy fizyczne badanego materiału i elementów. Dzięki temu udało się w miarę wiernie odzwierciedlić na drodze symulacji komputerowych zachowanie elementów podczas ich pracy statycznej. Takie podejście wymagało od Autora wykonania wielu skomplikowanych eksperymentów, analiz i korekt przyjętych założeń i procedur badawczych. Należy wyróżnić tu przede wszystkim przeprowadzenie szerokiej i zaawansowanej analizy połączeń i ich modelowania, z uwzględnieniem zjawisk kohezyjnych i zidentyfikowanych mechanizmów zniszczenia.

Na osobną pochwałę i wyróżnienie zasługuje również zastosowanie nowoczesnych metod badawczych, w tym przede wszystkim przeprowadzenie analizy odkształceń badanych elementów przy użyciu techniki DIC. Pozwoliło to na prześledzenie deformacji i procesów niszczenia materiałów w sposób ciągły w trakcie procesu odkształcania. Osobną zaletą jest dokładność wyników uzyskiwanych przy użyciu cyfrowej analizy obrazu.

Dokonując osądu uzyskanych rezultatów należy podkreślić wspomnianą już dobrą zgodność wyników symulacji numerycznych MES i badań eksperymentalnych. Są one w dobrej zgodności jeśli chodzi o ocenę jakościową, a więc zachowanie badanych elementów podczas odkształcania, w tym potwierdzenie rozkładów pól odkształceń i na-

prężen obserwowanych na powierzchni badanych próbek i dźwigarów, jak również obrazów i mechanizmów zniszczenia. Ten drugi element jest o tyle istotny z naukowego jak i z praktycznego punktu widzenia, że dzięki opracowanej procedurze modelowania pracy analizowanych elementów w zakresie pozasprężystej pracy materiału możliwe jest symulowanie i przewidywanie momentu ich zniszczenia. To bardzo ważne w kontekście możliwości przyszłego kształtowania wzmocnień tego typu elementów oraz doboru poszczególnych materiałów wzmacniających, a także wykorzystania zdobytej wiedzy w analizach nośności i predykcji niszczenia elementów konstrukcyjnych.

Jednym z istotniejszych elementów charakteryzujących recenzowaną rozprawę, który już zasygnalizowano, jest interdyscyplinarność przeprowadzonych badań, wymagająca od Autora znajomości wielu zagadnień i metod badawczych. Przede wszystkim wykazał się on dobrymi podstawami teoretycznymi z zakresu mechaniki materiałów, wytrzymałości materiałów, ale także mechaniki pękania i mechaniki zniszczenia. Kolejną umiejętnością to zdolność prawidłowego zaplanowania, zorganizowania i przeprowadzenia badań eksperymentalnych. I wreszcie umiejętność budowy skomplikowanych, przestrzennych modeli numerycznych MES oraz prowadzenia symulacji i analiz otrzymanych wyników. Te kompetencje umożliwiły przeprowadzenie badań w szerokim, komplementarnym zakresie, dzięki czemu udało się uzyskać zweryfikowane i potwierdzone wyniki.

Podsumowując, należy bardzo wysoko ocenić warsztat naukowo-badawczy mgr inż. Bartosza Kaweckiego, który realizując obszerny zakres prac w przemyśle, kompleksowy i interdyscyplinarny sposób potraktował postawiony w pracy problem naukowy. Dzięki przyjętej koncepcji i metodologii udało się zbadać pracę statyczną analizowanych elementów, opracować odpowiednie modele obliczeniowe oraz finalnie porównać i zweryfikować uzyskane rezultaty.

Z pełnym przekonaniem można zatem potwierdzić wysokie kompetencje mgr inż. Bartosza Kaweckiego w zakresie prowadzenia prac naukowo-badawczych. Dał on temu wyraz w trakcie przygotowywania recenzowanej rozprawy doktorskiej, gdzie wykazał się dużą samodzielnością w realizacji badań oraz rozwiązywaniu problemów naukowych.

Głównym osiągnięciem recenzowanej rozprawy jest rozwiązanie postawionego w niej problemu badawczego, tj. modelowania pracy statycznej dźwigarów drewnianych zbrojonych kompozytami CFRP. Jak już zaznaczono wcześniej, problem ten jest istotny z naukowego punktu widzenia, a jego rozwiązanie poszerza stan wiedzy w dziedzinie konstrukcji drewnianych, mechaniki materiałów kompozytowych oraz modelowania numerycznego konstrukcji budowlanych. Należy również podkreślić inżynierski aspekt przeprowadzonych badań, symulacji numerycznych, analiz oraz uzyskanych wyników, w tym propozycje modeli obliczeniowych elementów będących przedmiotem badań. W tym kontekście należy wysoko ocenić rezultaty uzyskane przez mgr inż. Bartosza Kaweckiego z uwagi na fakt, że mogą one znaleźć bezpośrednie zastosowanie w praktyce inżynierskiej.

Dokonując całościowej oceny uzyskanych w dysertacji wyników należy stwierdzić, że główne cele badawcze wyznaczone w rozprawie zostały osiągnięte. Uzyskane przez mgr inż. Bartosza Kaweckiego rezultaty cechują się wysoką wartością naukową. Mogą one być bezpośrednio wykorzystane w prowadzonych analizach, ale także stanowią punkt wyjścia do dalszych prac.

W opinii recenzenta takim kolejnym etapem mogłaby być próba opracowania kolejnych modeli i procedur uproszczonych, gdzie analizowane dźwigary modelowane byłyby w postaci struktur 2D. Uprościłoby to znacznie prowadzenie skomplikowanych i czasochłonnych symulacji opartych o modele trójwymiarowe.

Ostatni aspekt oceny merytorycznej pracy to jej przygotowanie pod względem edytorskim. W tym zakresie należy ocenić ją bardzo wysoko. Autor dokonał poprawnego i logicznego podziału pracy na poszczególne rozdziały. Treści w nich zawarte są prezentowane w sposób spójny. Czytelnik jest wprowadzany w tematykę pracy, a następnie zapoznaje się z wykonanymi badaniami i symulacjami oraz analizą uzyskanych wyników. Finalnie rozprawa prowadzi do podsumowania, gdzie omówiono całość wykonanych prac i uzyskanych wyników. Z edycyjnego punktu widzenia należy stwierdzić, że recenzowana praca została przygotowana w sposób bardzo estetyczny i czytelny. Zarówno opisy, jak i wzory i ilustracje są przygotowane w sposób bardzo przejrzysty. Dotyczy to szczególnie wykresów oraz wyników symulacji numerycznych i badań obrazowych. Podsumowując, należy pochwalić mgr inż. Bartosza Kaweckiego za dbałość o formę, wygląd i czytelność recenzowanej rozprawy.

## 6. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Choć całościowa ocena merytoryczna rozprawy jest pozytywna, to pewne kwestie w niej zawarte wymagają wyjaśnienia i uzupełnienia. Uwagi krytyczne i dyskusyjne w tym zakresie zestawiono poniżej.

1. W badaniach uwzględniono anizotropię drewna przyjmując ortotropowy model określony kierunkami 1-2-3. W tym zakresie przydałby się krótki opis budowy i zastosowanego modelu drewna wraz z rysunkiem, na którym oznaczonoby kierunki (płaszczyzny) ortotropii w odniesieniu do głównych kierunków wyróżnianych w drewnie definiowanych najczęściej jako *L-T-R*, wg. notacji anglojęzycznej *Longitudinal-Tangential-Radial*. Dzięki temu kierunki te mogłyby być łatwo kojarzone w orientacją pozostałych materiałów użytych do wykonania połączeń i wzmocnień.
2. W rozdziale 2.1 nie przedstawiono podstawowych informacji na temat parametrów definiujących odporność na pękanie materiałów, ogólnego modelu CDM, jak również nie przybliżono funkcji Hilla. Podanie tych informacji byłoby przydatne dla czytelników mniej zorientowanych w tematyce.
3. W studiach literaturowych należałoby szerzej przeanalizować prace prof. Jerzego Jasieńki, w tym choćby monografię „*Połączenia klejowe w rehabilitacji i wzmacnianiu drewnianych belek zginanych*”, gdzie zawarto wiele wyników badań wpisujących się w tematykę podjętą w rozprawie.
4. Na końcu przeglądu literatury brakuje ogólnego podsumowania, w którym wypunktowanoby i przedyskutowano najważniejsze problemy wymagające rozwiązania i kierunki badań prowadzonych aktualnie w omawianym zakresie.
5. W rozdziale 3.3 przyjęto kryterium będące podstawą do uznania symulacji numerycznych za zakończone, zakładając, że moment ten odpowiada fazie, gdy dochodzi do uplastycznienia połowy wysokości strefy rozciąganej drewna. Na jakiej podstawie przyjęto powyższe założenie? Czy zjawisko to zostało zbadane i zweryfikowane eksperymentalnie?
6. Na stronie 48 podano informację dotyczącą dokładności numerycznego szacowania obciążenia o treści: *siłę maksymalną można natomiast przewidywać z dokładnością wynoszącą 1.5%*. Jednakże analizując dokładnie wykres pokazany na rysunku 3.14 można stwierdzić, że sumaryczne przemieszczenia



- względne porównywalnych poziomów siły  $P$ , symulowanej i wyznaczonej eksperymentalnie jako wartość średnia w zakresie plastycznym, wynoszą odpowiednio  $\Delta u_n \approx 105$  mm i  $\Delta u_e \approx 80$  mm. Biorąc pod uwagę tak znaczącą różnicę deformacji elementów należałoby nieco zrewidować dyskutowaną tu zgodność numerycznego symulowania siły.
7. Jak zdefiniowano odkształcenia odrywające opisane zależnościami 4.1, które zostały użyte jako wartości referencyjne podczas modelowania połączeń klejonych, co opisano w rozdziale 4?
  8. Jaka finalnie wartość (wartości) parametru  $M$  podanego w tabeli 4.1 przyjęto w proponowanym modelu obliczeniowym?
  9. Ogólne określenie wielkości  $G_{ac}$ , gdzie  $\alpha = 1, 2$  lub  $3$  i oznacza odpowiedni sposób obciążenia elementu ze szczeliną, jako energia pęknięcia w ocenie recenzenta jest niepoprawne. Wielkość ta jest definiowana jako krytyczna wartość współczynnika (prędkości) uwalniania energii, z ang. *critical energy release rate*.
  10. W rozdziale 5, a szczególnie w podrozdziale 5.1.2, nie zestawiono podstawowych charakterystyk mechanicznych zastosowanego kleju i materiału drzewnego. Jednocześnie w tabeli 5.2 i na stronie 61 podano pewne informacje w tym zakresie. Wymaga to uzupełnienia i uporządkowania.
  11. Należy wyjaśnić wzrost nośności niektórych elementów typu  $KW$  w zakresie pozasprężystym, który można zaobserwować analizując wyniki badań laboratoryjnych połączeń drewno-CFRP w zakresie zależności siła-przemieszczenie względne ( $P/\Delta u$ ) pokazanych na rysunku 5.19.
  12. Jak można wyjaśnić około dwukrotnie wyższą sztywność kohezyjną spoiny w próbkach typu  $K$  ( $K_a = 91,32$  MPa/mm wg tab. 5.2) w porównaniu do sztywności wyznaczonej dla spoiny typu  $KW$  ( $K_a = 49,51$  MPa/mm wg tab. 5.4)?
  13. W badaniach elementów w skali technicznej zastosowano belki, dla których stosunek  $L/h \approx 11$  (wg tab. 6.1). Czy w jakikolwiek sposób uwzględniono wpływ ścinania, który jest zauważalny przy  $L/h < 16$ ?
  14. Na rysunku 6.1 pokazano elementy przeznaczone do badań. Czy z elementów oznaczonych jako  $K$  i  $KW$  wycięto próbki modelujące połączenia, które poddano badaniom opisanym w rozdziałach 5.1 i 5.2?
  15. Czy podczas badań wytrzymałościowych dźwigarów obserwowano zjawisko zwichrzenia?
  16. Na stronie 85 podano informację, że badania prowadzono aż do zniszczenia elementów. Jednakże nie wynika to z przebiegu ścieżek równowagi  $P(w)$  pokazanych na wykresach umieszczonych na rysunku 6.8.
  17. Czy wartość współczynnika korygującego  $\psi = 0,85$  można traktować jako uniwersalną?
  18. Jak określono naprężenia styczne inicjujące pęknięcie, które przyjęto jako wartości referencyjne podczas analizy delaminacji połączeń klejonych, co przedyskutowano w rozdziale 6.4.6? Czy określono je numerycznie, eksperymentalnie lub przyjęto z literatury?
  19. Mając na uwadze możliwości praktycznego wykorzystania proponowanej procedury obliczeniowej w pracy powinny być podane parametry symulacji numerycznych związane z czasem prowadzonych obliczeń, a dokładniej prędkość przyrostu odkształcenia (zakres statyczny, quasi-stacyjny?). Interesujące w tym zakresie są możliwości przyspieszenia obliczeń, dzięki zastosowaniu niektórych procedur, jak choćby skalowanie masy.
  20. W opinii recenzenta na końcu rozprawy brakuje rozdziału, ew. załącznika, gdzie w sposób syntetyczny przedstawionyby opracowany model obliczeniowy, np. w formie procedury modelowania dźwigarów drewnianych wzmacnianych CFRP.

W recenzowanej pracy zauważono również pewne usterki natury porządkowej, które wymagają poprawy i uzupełnienia.

1. Nie zdefiniowano dokładnie sumarycznego przemieszczenia względnego  $\Delta u$ .
2. W rozdziale 4.2 posłużono się parametrem odporności na pękanie  $G_c$ , nie definiując go.
3. Korekty wymagają podpisy rysunków 5.12-5.15 – brakuje informacji o prezentowanych rozkładach odkształceń oraz źródle tych danych (MES, DIC?).
4. W tekście pracy należałoby dodać krótki opis próbek typu  $K$  i  $KW$ .
5. Niektóre pozycje bibliograficznych zawierają błędne dane, np. [3].
6. Dyskusyjne są pewne kwestie gramatyczne, np. odmiana słowa *lamele* itp.

Powyższe uwagi nie podważają zasadniczych osiągnięć przedstawionych w rozprawie i nie wpływają w istotny sposób na uzyskane wyniki. Stanowią natomiast kwestie, które należy doprecyzować, przedyskutować i ewentualnie poprawić pod kątem przyszłych publikacji.

## 7. Wniosek końcowy

Podsumowując całościowo recenzowaną rozprawę trzeba przede wszystkim potwierdzić i docenić jej wysoką wartość naukową, gdyż problematyka modelowania pracy kompozytowych dźwigarów drewniano-polimerowych jest oryginalna i aktualna. Zadanie opracowania modelu obliczeniowego tego typu elementów zostało wykonane w sposób kompleksowy i umiejętny, stosując nowoczesną metodologię badawczą. Tym samym uprawnione jest stwierdzenie, że przedmiotowa dysertacja to bardzo cenne opracowanie naukowe, zawierające wiele istotnych i wartościowych rezultatów. W opinii Recenzenta cele naukowe określone w rozprawie zostały osiągnięte. Nie bez znaczenia jest również praktyczny aspekt przeprowadzonych badań, obliczeń i analiz, a przede wszystkim uzyskanych wyników. Proponowane w pracy procedury i modele obliczeniowe mogą być stosowane w praktyce inżynierskiej, a tym samym cechują się wysokim walorem aplikacyjnym.

Ocena kompetencji mgr inż. Bartosza Kaweckiego, którymi wykazał się podczas przygotowywania przedmiotowej dysertacji, jest wysoka. Trafnie dobrał on obszar tematyczny oraz wykazał się dobrą znajomością literatury przedmiotowej. Kandydat przeprowadził dobrze przemyślane i zaplanowane badania eksperymentalne, w ramach których przeanalizował pracę statyczną przedmiotowych dźwigarów oraz połączeń oraz wyznaczył szereg kluczowych parametrów mechanicznych. Przeprowadził skomplikowane i zaawansowane symulacje numeryczne, w których starał się modelować pracę badanych próbek i elementów. Umożliwiło to symulację zachowania się analizowanych elementów w zakresie sprężysto-plastycznej pracy materiału kompozytowego drewno-polimer, jak również identyfikację mechanizmów i form jego zniszczenia. Na osobne wyróżnienie zasługuje dogłębnie potraktowana tematyka połączeń. Przeprowadzenie w szerokim zakresie analizy krytycznej, walidacji modeli numerycznych i weryfikacji uzyskanych wyników pozwoliło na ostateczne określenie procedury modelowania dźwigarów kompozytowych drewno-polimerowych, jak również propozycję modeli obliczeniowych. W pełni uzasadnionym jest zatem stwierdzenie, że Kandydat wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań i rozwiązywania problemów naukowych, co potwierdza Jego wysokie kompetencje i predyspozycje do prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Uwzględniając wszystko co powyższe stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Kaweckiego pt. „Dobór parametrów modeli obliczeniowych pełnych dźwigarów z kompozytów drewno-polimerowych zbrojonych włóknami” spełnia wymagania ustawowe, określone w art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 roku, Nr 65, poz. 595, wraz z późn. zm.) oraz Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U z 2011 roku, nr 204, poz. 1200, wraz z późn. zm.). Przedmiotowa praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Kandydat wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej Inżynieria Lądowa i Transport, obejmującą tematykę konstrukcji drewnianych, mechaniki materiałów kompozytowych oraz komputerowego modelowania konstrukcji budowlanych, a także wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Wnioskuje o przyjęcie recenzowanej rozprawy doktorskiej i dopuszczenie mgr inż. Bartosza Kaweckiego do publicznej obrony.

Jednocześnie mając na uwadze wysoką ocenę recenzowanej pracy wnioskuje o jej wyróżnienie.

Paweł Kossakowski