

Poznań, dnia 18 stycznia 2021 r.

Dr hab. inż. Zbigniew Pozorski
Instytut Analizy Konstrukcji
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 5
60-965 Poznań

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgra inż. Bartosz Kaweckiego pt.:

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

Promotor: dr hab. inż. Jerzy Podgórski, prof. PL

Niniejszą recenzję opracowano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Lubelskiej z dnia 04.12.2020 r.

1. Ogólna charakterystyka tematyki rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Bartosza Kaweckiego są dźwigary kompozytowe wykonane z warstw drewna i taśm polimerowych CFRP. Poszczególne elementy dźwigara są łączone ze sobą za pomocą kleju poliuretanowego. Celem rozprawy było opracowanie zaawansowanych modeli obliczeniowych analizowanych dźwigarów oraz opracowanie procedur badawczych pozwalających na dobór parametrów tych modeli.

2. Zawartość rozprawy

Recenzowana praca Pana mgra inż. Bartosza Kaweckiego składa się z ośmiu rozdziałów, a ponadto: streszczenia w języku polskim i angielskim, wykazu symboli i oznaczeń, wykazu akronimów oraz bibliografii. Rozprawa liczy 135 stron.

Rozdział 1 jest rozdziałem wstępnym, w którym przedstawiono wprowadzenie do tematyki poruszanej w rozprawie, zdefiniowano problem i cel naukowy oraz opisano zakres pracy.

Celem rozprawy jest określenie właściwego sposobu modelowania drewna przy zginaniu w zakresie liniowo-sprężystym oraz jego zniszczenia, a następnie analiza spoin klejonych i ich wpływu na pracę dźwigarów oraz stworzenie wytycznych doboru parametrów dla przyjętego modelu obliczeniowego.

Rozdział 2 stanowi przegląd literatury dotyczący modelowania nieliniowego zachowania się drewna, badania połączeń klejonych w kompozytach zawierających drewno, oraz zagadnienia wzmocnienia dźwigarów wykonanych z drewna lub drewna klejonego. Przedstawione oraz porównane zostały trzy podstawowe modele uwzględniające zniszczenie materiału. Następnie omówiono publikacje dotyczące badania i modelowania połączeń klejonych w drewnie oraz różnych form wzmocnienia drewna.

Rozdział 3 przedstawia założenia dotyczące modelu drewna. W zakresie sprężystym przyjęto model drewna jak dla materiału ortotropowego. Do opisu płynięcia materiału zastosowano funkcję Hilla. W tym samym rozdziale wyznaczono wybrane parametry materiałowe. Moduł sprężystości wzdłuż włókien wyznaczono z badania 3-punktowego zginania, przy czym założono określoną relację pomiędzy modułem ścinania a modułem sprężystości. Pozostałe moduły określono na podstawie relacji znanych z literatury. Podobnie postąpiono z parametrami wytrzymałościowymi: wyznaczono wytrzymałość na rozciąganie podczas próby zginania, a na podstawie uzyskanej wartości i korzystając z relacji dostępnych w literaturze ustalono pozostałe wytrzymałości drewna. Moduł sprężystości wzdłuż włókien oraz wytrzymałość na rozciąganie (przy zginaniu) wyznaczono dla 8 próbek o wymiarach 94 mm x 40 mm x 2000 mm.

W rozdziale 4 omówiono teorię związaną z modelowaniem połączenia klejonego za pomocą elementów kohezyjnych. Przedstawiono zagadnienia zachowania sprężystego materiału, inicjacji uszkodzenia i degradacji materiału, oraz poprawy zbieżności rozwiązania poprzez wprowadzenie parametru lepkości. Przedstawiony model jest dostępny w programie Abaqus.

W rozdziale 5 przedstawiono badania doświadczalne dotyczące określenia właściwości połączeń klejonych drewno-drewno oraz drewno-CFRP wykonanych za pomocą kleju poliuretanowego. Zakres badań obejmował ścinanie połączenia dwu-zakładkowego w połączeniu trzech elementów prostokątnych. Pan mgr Bartosz Kawecki zaproponował sposób doboru sztywności kohezyjnej kleju, a następnie porównał wyniki MES z modelem połączenia dwu-zakładkowego Tsai. Porównana została również relacja pomiędzy siłą i wzajemnym przemieszczeniem elementów połączenia, jak również wartość siły niszczącej

tego powodu, temat i zakres rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Bartosza Kaweckiego należy uznać za uzasadniony.

W celu opracowania modelu numerycznego rozpatrywanych dźwigarów oraz określenia odpowiednich parametrów modelu, Autor rozprawy wykonał szereg badań doświadczalnych. Badania te obejmowały określenie właściwości drewna w teście 3-punktowego zginania, określenie sztywności połączenia klejonego w teście ścinania połączenia 2-zakładkowego, oraz ocenę wpływu taśm CFRP na zachowanie się belek kompozytowych w teście 4-punktowego zginania. Badania laboratoryjne posłużyły do weryfikacji zakładanych teorii oraz do określenia niezbędnych parametrów modeli numerycznych. Pan mgr inż. Bartosz Kawecki bardzo konsekwentnie prowadził badania i uzasadniał kolejne etapy pracy zmierzając do stworzenia wiarygodnego modelu belki kompozytowej oraz opracowania procedury doboru parametrów tego modelu. W pracy umiejętnie wykorzystywane były również wyniki badań innych badawczy zajmujących się podobną tematyką.

Do oryginalnych osiągnięć Autora rozprawy należy zaliczyć opracowanie procedur doboru parametrów złożonego modelu numerycznego bazujących na wynikach prostych testów wytrzymałościowych. Innym osiągnięciem jest opracowanie samego modelu numerycznego umożliwiającego nieliniową analizę dźwigarów kompozytowych zbrojonych taśmami CFRP. Model ten precyzyjnie odzwierciedla sztywność dźwigarów oraz pozwala na dość dokładne określenie siły niszczącej. Ważnym wkładem Autora rozprawy w rozwój mechaniki struktur wykonanych z drewna i wzmacnianych taśmami kompozytowymi są liczne wnioski o charakterze praktycznym, m.in.:

- udowodniono, że pomijanie podatności połączeń klejonych prowadzi do znacznych błędów obliczeniowych,
- wykazano, że połączenie drewno-CFRP wykazuje niższą sztywność i wytrzymałość niż połączenie drewno-drewno,
- porównano sztywność i nośność belek wykonanych w różnych konfiguracjach taśm wzmacniających i wykazano, które rozwiązania są korzystniejsze,
- przedstawiono możliwość wykorzystania modelu uproszczonego o zastępczym przekroju, który będzie przydatny do inżynierskiego projektowania konstrukcji z kompozytów drewno-CFRP.

Reasumując ogólną ocenę rozprawy, uważam, że zaprezentowane w pracy rezultaty stanowią w dużej części oryginalny wkład Autora w zagadnienie modelowania dźwigarów kompozytowych z drewna klejonego wzmacnianego taśmami CFRP.

połączenie. W pracy przedstawiono również ciekawą dyskusję dotyczącą przebiegu zniszczenia połączenia.

W rozdziale 6 przedstawiono wyniki badań i modelowania elementów konstrukcyjnych wykonanych z drewna klejonego wzmacnianego taśmami CFRP. Badania doświadczalne 4-punktowego zginania wykonano na 21 próbkach (belkach kompozytowych) o różnej konfiguracji. W drugiej części rozdziału przedstawiono model MES uwzględniający sztywność połączenia kohezyjnego oraz porównano wyniki numeryczne z wynikami uzyskanymi w laboratorium. Autor szczegółowo omawia przyjęty sposób określania siły normalnej oraz mechanizm zniszczenia belek.

W rozdziale 7 podjęto próbę przedstawienia modelu uproszczonego, którego istota polega na sprowadzeniu przekroju kompozytowego do przekroju o zróżnicowanych szerokościach warstw, ale o jednakowych właściwościach materiałowych (w tym przypadku - takich jak drewno). Autor rozprawy obszernie omawia wykorzystania takiego modelu w projektowaniu inżynierskim, wyciągając przy okazji ciekawe wnioski dotyczące efektywności stosowania taśm wzmacniających CFRP. W rozdziale 8 zaprezentowano podsumowanie i ogólne wnioski końcowe.

3. Uwagi ogólne

Rozprawa Pana mgra inż. Bartosza Kaweckiego dotyczy zagadnienia doboru parametrów modeli obliczeniowych dźwigarów wykonanych z drewna klejonego i wzmacnianych taśmami CFRP. Konstrukcje z drewna klejonego mają szereg licznych zalet. Są to konstrukcje trwałe, lekkie i posiadające wysoką izolacyjność termiczną. Drewno jest często traktowane jako materiał podnoszący estetykę obiektu. Ponadto charakteryzuje się wysoką elastycznością w kształtowaniu różnorodnych form geometrycznych. Pomimo dość dobrej relacji pomiędzy nośnością i ciężarem konstrukcji drewnianych, stale trwają badania nad poprawieniem tej relacji. Jednym ze skutecznych sposobów podniesienia nośności konstrukcji jest zastosowanie taśm kompozytowych. Taśmy kompozytowe można wykorzystywać zarówno do konstrukcji nowoprojektowanych, jak i do wzmacniania lub naprawy konstrukcji istniejących. Metoda ta jest znana i stosowana od wielu lat, jednak stosowana jest częściej w stosunku do konstrukcji żelbetowych niż drewnianych. Pośród wielu powodów takiej sytuacji (kosztowność metody, dostępne alternatywne metody naprawy, wymogi technologiczne, efekt estetyczny, itd...) wymienić możemy również pewien niedobór sprawdzonych i wiarygodnych modeli numerycznych pomocnych w analizie konstrukcji drewnianych wzmacnianych włóknami. Z

4. Uwagi szczegółowe

Poniżej przedstawiam kilka uwag i komentarzy, które pojawiły się podczas czytania rozprawy.

1. Rozprawa jest napisana starannie, jednak Autor nie ustrzegł się kilku błędów o charakterze edytorskim:
 - str. 14 – błędne oznaczenie naprężeń normalnych w odpowiednich kierunkach,
 - str. 19 – w pierwszym zdaniu wydaje się, że należałoby napisać „zachowania się drewna” zamiast „zachowania drewna”,
 - str. 19 – ostatnia linia – powinno być „w pracach” zamiast „pracach”
 - str. 30 – zdanie „Najczęściej wykorzystywanym spoiwem jest klej epoksydowy, a schemat statyczny to czteropunktowe zginanie.” jest trochę niefortunne, choć można się łatwo domyślić co Autor miał na myśli,
 - str. 30 powyżej rysunku – powinno być „Podobne testy rozszerzone o dodatkowe...” zamiast „rozszerzone do ...”,
 - str. 46 – wyrażenie „(elementy) pracują prawidłowo w złożonym stanie naprężenia” to kolokwializm,
 - tr. 94 – w tabeli 6.8 podane wartości sztywności należy uzupełnić o jednostki,
 - str. 98 – edytorski błąd w zdaniu „ Domyślnie analiza byłaby prowadzona wystąpienia błędu wynikającego ze zbyt znacznego zniekształcenia elementów skończonych.”.
2. Strona 40, równanie $G_{12} = E_1/16$. Powyższa relacja jest dość silnym założeniem, które nie zostało skomentowane przez Autora. Szkoda też, że nie została podjęta próba wyznaczenia modułu G_{12} .
3. Bardzo interesującą kwestią jest zależność parametrów drewna od jego gęstości. W rozprawie badano próbki o bardzo zróżnicowanej gęstości. Niestety, jak rozumiem, wpływ gęstości nie został uwzględniony w parametrach modelu belek z drewna klejonego (rozdział 6).
4. Strona 46, równanie (3.15). Nie podano uzasadnienia redukcji wytrzymałości na zginanie.
5. Strona 56 – uważam, że wymiary próbek należałoby przedstawić na rysunku lub opisać na zdjęciu.
Strona 58 – podobna uwaga jak powyżej – wielkości L_a i h_l są przedstawione dopiero na stronie 63.
6. Wzory (5.3), (5.4), (5.5) – bardzo wartościowa byłaby analiza relacji pomiędzy wielkościami poszczególnych przemieszczeń. Cenne byłoby wyjaśnienie (wyprowadzenie) wzoru (5.5), który jest efektem przyjęcia kilku założeń. Warto też dodać, że całkowita różnica przemieszczeń (5.2) zależy od tego, na jakim poziomie próbki ją wyznaczamy.
7. Strona 59, poniżej równania (5.6) Autor pisze, że „bezpośrednie obliczenie wartości sztywności kohezyjnej połączenia nie jest możliwe, ze względu na to, że dla rozważanych parametrów nie występuje rozwiązanie odwrotne”. Choć wydaje mi się, że rozumiem, co

Autor miał na myśli, to uważam, że jest to twierdzenie dyskusyjne. Tym bardziej, że tuż poniżej, w równaniu (5.8) ta sztywność została wyznaczona.

8. Strona 60: dlaczego w równaniu (60) sztywność kohezyjna połączenia (w zasadzie - na ścinanie) zależy od modułu sprężystości drewna?
9. Strona 67, Autor pisze „Taka sytuacja wynika z wytrzymałości drewna w poprzek włókien, którą w tym przypadku należy przyjąć jako wytrzymałość na rozciąganie”. Przyznam, że nie rozumiem tego wniosku, bo przyczyny sytuacji, o której pisze Autor mogą być inne.
10. Strona 94, tabela 6.7 – choć rozumiem zastosowaną technikę dopasowania współczynnika tarcia w celu uzyskania sztywności belki zgodnej z wynikiem doświadczalnym, to zauważę również, że współczynnik ten o wartości 0,01 jest raczej nierealny.
11. Strona 95 – Autor stosuje kolejne dopasowanie modelu współczynnikiem $\psi = 0,85$. Na szczęście wyniki dla parametrów zredukowanych zostały przedstawione wraz z wynikami uzyskanymi dla parametrów pierwotnych.
12. Strona 112, wzór (7.2) – w celu uwzględnienia wpływu deformacji postaciowych drewna na ugięcie belki, Autor proponuje redukcję modułu sprężystości podłużnej. Choć rozumiem intencję, to uważam, że jest to zabieg, który może prowadzić do niepotrzebnych i trudnych do kontroli błędów, gdyż ugięcia od zginania i ścinania w różnej potędze zależą od rozpiętości belki i wysokości jej przekroju poprzecznego.

Powyższe uwagi szczegółowe powinny być, w moim przekonaniu, uwzględnione w planowanych przez Autora publikacjach naukowych. Przedstawione uwagi nie wpływają na pozytywną i wysoką ocenę poziomu rozprawy.

5. Wnioski końcowe recenzji

Podsumowując recenzję stwierdzam, że Pan mgr inż. Bartosz Kawecki w rozprawie doktorskiej „Dobór parametrów modeli obliczeniowych pełnych dźwigarów z kompozytów drewno-polimerowych zbrojonych włóknami”:

- zrealizował cel rozprawy,
- wykazał się umiejętnością samodzielnej pracy badawczej, znajomością literatury światowej i bogatą wiedzą w dziedzinie badań doświadczalnych i modelowania numerycznego,
- uzyskał oryginalne rezultaty naukowe dotyczące zachowania się dźwigarów kompozytowych,

- opracował zaawansowany model numeryczny służący do symulacji zachowania się dźwigarów z drewna klejonego i wzmacnianych taśmami CFRP, poddanych obciążeniom statycznym,
- opracował autorską procedurę doboru parametrów dla przyjętego modelu numerycznego.

Na podkreślenie zasługuje umiejętność Autora do twórczego i konsekwentnego rozwijania wiedzy w zakresie mechaniki konstrukcji, metod doświadczalnych i komputerowych metod analizy. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazała wysoką wiedzę teoretyczną Pana mgr inż. Bartosz Kaweckiego.

Recenzowana praca spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.



dr hab. inż. Zbigniew Pozorski
Poznań, 18.01.2021 r.

