

Poznań, dnia 07 stycznia 2022 r.

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

### **Recenzja**

rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Sokołowskiego pt.:  
„Analiza pracy statycznej zginanych belek drewnianych wzmocnianych  
siatką z włókna PBO”

Promotor: dr hab. inż. Paweł Kossakowski, prof. PŚk

Niniejszą recenzję opracowano na podstawie umowy o dzieło zawartej z Politechniką Świętokrzyską dnia 29.11.2021 roku.

### **1. Ogólna charakterystyka tematyki rozprawy**

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Piotra Sokołowskiego są elementy konstrukcyjne z drewna litego wzmocniane przy użyciu siatki z włókien PBO zatopionej w matrycy żywicznej lub mineralnej. Celem rozprawy było opracowanie nowej technologii wzmocniania konstrukcji drewnianych oraz określenie efektywności zastosowanego wzmocnienia na podstawie wyników badań laboratoryjnych.

### **2. Zawartość rozprawy**

Recenzowana praca Pana mgra inż. Piotra Sokołowskiego składa się z dziewięciu rozdziałów oraz wprowadzenia i wykazu ważniejszych oznaczeń, skrótów i akronimów. Rozprawa liczy 262 strony.

wpłynęło dnia:

Data ..... 2022 -01- 14 .....

1

Podpis .....  .....

Rozdział 1 jest rozdziałem wstępnym przedstawiającym ogólną charakterystykę drewna oraz motywację badań nad wzmacnianiem konstrukcji drewnianych. W rozdziale 2 sformułowano cel, zakres i tezy pracy oraz przedstawiono problem naukowy.

Rozdział 3 stanowi obszerny przegląd literatury dotyczącej diagnostyki obiektów budownictwa drewnianego, metod wzmacniania konstrukcji drewnianych (tradycyjnych oraz wykorzystujących materiały kompozytowe) oraz literatury dotyczącej samych materiałów kompozytowych. Przegląd literatury jest ukierunkowany na praktyczne zastosowania kompozytów do wzmacniania konstrukcji budowlanych. Na końcu rozdziału przedstawiono wnioski wynikające z przeglądu literatury, z którego wynika m.in. brak prac dotyczących wzmacniania konstrukcji drewnianych włóknami PBO.

Rozdział 4 przedstawia technologię wykonania kompozytu R-PBO oraz wyniki badań wstępnych, w których porównano belki z drewna litego bez wzmocnienia i ze wzmocnieniem. Badania wykazały znaczny przyrost wytrzymałości belek zginanych wykonanych z drewna ze wzmocnieniem kompozytowym. W dalszej części tego rozdziału przeprowadzono szerokie badania materiałowe kompozytów R-PBO i FRCCM, oraz wszystkich składowych tych kompozytów.

Rozdział 5 jest kluczowym rozdziałem rozprawy. W rozdziale tym opisano 5 sposobów wzmocnienia belek. Belki bez wzmocnienia oraz każda z serii belek wzmocnionych zostały poddane próbie 4-punktowego zginania, a wyniki ze sobą szczegółowo porównano. W drugiej części rozdziału belki wzmocnione badano na zginanie w podwyższonej temperaturze. Badanie to wynikało z zauważonej wrażliwości wzmocnienia kompozytowego na temperaturę otoczenia. Autor rozprawy opracował metodę zapewnienia podwyższonej temperatury podczas 4-punktowego zginania, a następnie przeprowadził badanie i wyciągnął wnioski z uzyskanych wyników.

Rozdział 6 zawiera statystyczne opracowanie wyników przeprowadzonych badań. Jest to ciekawy rozdział, w którym przedstawiono możliwości zastosowania narzędzi statystycznych. Dzięki przeprowadzonej analizie wykazano m.in., że wzmocnienie boczne belek istotnie zwiększa jedynie siłę maksymalną (niszczącą).

W rozdziale 7 zaprezentowano podsumowanie rozprawy i ogólne wnioski końcowe, a w rozdziale 8 sformułowano kierunki dalszych prac i badań. Rozdział 9 to wykaz literatury zawierający 243 pozycje.

### 3. Uwagi ogólne

Rozprawa Pana mgra inż. Piotra Sokołowskiego dotyczy zagadnienia wzmocnienia konstrukcji drewnianych za pomocą kompozytów wykorzystujących siatkę z włókien PBO zatopionych w matrycy żywicznej lub mineralnej. Taśmy kompozytowe są stosowane do wzmocnienia konstrukcji od wielu lat, jednak zazwyczaj dotyczyło to konstrukcji betonowych i żelbetowych. Z tego względu, zaproponowane w rozprawie rozwiązanie materiałowe stanowi ciekawą alternatywę dla klasycznych metod wzmocnienia konstrukcji drewnianych. Ze względu na trudności w szacowaniu nośności wzmocnianych elementów konstrukcyjnych, przeprowadzone badania doświadczalne będące główną częścią rozprawy Pana mgra inż. Piotra Sokołowskiego należy uznać za bardzo uzasadnione. Temat rozprawy i jej zakres są interesujące z naukowego i inżynierskiego punktu widzenia.

W celu realizacji celu rozprawy, Autor przeprowadził szerokie studia literaturowe, a następnie zaprojektował i opracował technologię wykonania kilku rozwiązań wzmocnienia elementów drewnianych za pomocą kompozytów z siatkami PBO. Ciekawą propozycją Autora rozprawy jest zastosowanie matrycy mineralnej w kompozycie wzmocniającym drewno. Ocena efektywności różnych rozwiązań wzmocnienia elementów drewnianych została wykonana na podstawie testów 4-punktowego zginania. Pan mgr inż. Piotr Sokołowski wykonał kilkadziesiąt testów w temperaturze otoczenia oraz w temperaturze podwyższonej (60-70°C). Wykonanie badań w podwyższonej temperaturze wymagało opracowania metody ogrzania próbek do wymaganej temperatury. Ponadto w rozprawie zaprezentowano wyniki badań wytrzymałościowych drewna, samych kompozytów oraz składowych kompozytów (siatki z włókien i matrycy). Na końcu rozprawy przedstawiono interesujące opracowanie statystyczne wyników badań. Pan mgr inż. Piotr Sokołowski w sposób spójny i konsekwentny przeprowadził zaplanował i przeprowadził badania.

Do oryginalnych osiągnięć Autora rozprawy należy zaliczyć zbadanie efektywności zastosowania kompozytów R-PBO i FRCCM do wzmocnienia elementów drewnianych. Efektywność ta była mierzona poprzez porównanie siły maksymalnej uzyskanej podczas badania oraz ugięcia badanego elementu. Ponadto porównano czas niezbędny do zniszczenia próbki oraz zdefiniowaną w rozprawie sztywność i moduł sprężystości przy zginaniu. Ważnym wkładem Autora rozprawy w rozwój mechaniki struktur wykonanych z drewna i wzmocnianych taśmami kompozytowymi są wnioski ilościowe dotyczące skuteczności wzmocnienia belki drewnianej o przekroju 80 mm × 80 mm. W rozprawie m.in.:

- wykazano wzrost siły niszczącej dla wzmocnionych belek badanych w temperaturze otoczenia od 97% do 143%, przy czym wzrost ten zależał od metody wzmocnienia,
- wykazano wzrost siły niszczącej dla wzmocnionych belek badanych w podwyższonej temperaturze; siła niszcząca wahała się między 10,93 kN a 14,73 kN (w zależności od metody wzmocnienia), w porównaniu do siły niszczącej dla belki bez wzmocnienia 10,13 kN,
- wykazano, że zastosowanie wzmocnienia kompozytowego w niewielkim zakresie poprawia sztywność badanych elementów.

Reasumując ogólną ocenę rozprawy, uważam, że zaprezentowane w pracy rezultaty stanowią w dużej części oryginalny wkład Autora w zagadnienie wzmocniania elementów drewnianych za pomocą kompozytów wykorzystujących siatkę z włókien PBO zatopioną w matrycy żywicznej lub mineralnej.

#### 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 drobnych błędów o charakterze edytorskim:
  - str. 51, (3 linia od dołu) – zamiast „w wskutek” powinno być np. „wskutek”,
  - str. 111 – na rysunku w tab. 111 warto wskazać, gdzie jest  $b_e$  i  $l_e$  (zgodnie z (12)),
  - str. 130 – „w rozdziale 6.0” – nie ma takiego rozdziału,
  - str. 211 – zdanie „Przedmiotem analizy jest „uargumentowanie sensowności i rentowności takiego posunięcia” jest mało precyzyjne.
2. Niektóre sformułowania użyte w rozprawie są mało precyzyjne lub niejasne:
  - str. 12 (2 linia) – jak należy rozumieć wyrażenie „masa ograniczona gęstością”?
  - str. 43 (3 linia od dołu): wyrażenie „naprężenia zginające” jest zrozumiałe, choć według mnie powinno się używać wyrażenia „naprężenia normalne (przy zginaniu lub wywołane zginaniem)”,
  - str. 50 (2 linia od dołu) „wzmacnia się element w jego strefie zginanej”; to wyrażenie jest niezrozumiałe ponieważ zazwyczaj element jest zginany na całej długości; ponadto cały przekrój jest zginany, ale za to możemy wyróżnić strefę ściskaną i rozciąganą,

- str. 53 (wykres nr 6 i 7) – wykres nie jest zrozumiały bo nie omówiono dokładnie użytych oznaczeń; to dość typowy problem przy wykorzystywaniu wyników zaczerpniętych z literatury; podobnie niezrozumiałe są np. wyniki przedstawione na rys. 37,
  - str. 69 (ostatni akapit) „w przeciwieństwie do kruchego naprężenia...”?
  - str. 83 (3 linia od dołu) „technologii ... posiadających znaczny zapas nośności”?
  - str. 117 (pod rysunkami): wyrażenie „odkształcenia zginające” oraz opis równań (18-19) są niejasne,
  - str. 130 „Na podporach zastosowano również podkładki stalowe mające na celu zabezpieczenie badanych elementów przed wyboczeniem...”- co to za podkładki i w jaki sposób zabezpieczają?
  - str. 130 (rys. 111) i opis dotyczący rysunku – czy ugięcie jest mierzone pod belką, czy w środkowych włóknach belki, w jednym, czy w trzech punktach?
  - str. 209, punkt 5: „włókna siatki ukierunkowane były równoległe do włókien drewna i prostopadle do zginania” – co oznacza kierunek „prostopadły do zginania”?
  - str. 250 (kierunki dalszych prac i badań) – Autor planuje badania elementów drewnianych zmierzające do wyznaczenia nośności, szczelności i izolacyjności ogniowej; wydaje się, że badanie nośności ogniowej jest wystarczające w tym przypadku.
3. Tezy pracy (strona 16). Autor przewiduje wzrost nośności, wytrzymałości na zginanie, naprężeń i maksymalnego momentu zginającego. Moim zdaniem wszystkie te wielkości są ze sobą ściśle powiązane.
  3. Strona 18 (tab. 1). Dla obniżenia ciężaru objętościowego drewna o 30-38% podano obniżenie wytrzymałości drewna 100%. To oznacza wytrzymałość równą dokładnie 0 (współczynnik zmniejszający powinien wynosić 1). Czy taki był zamysł Autora? Podaję ten przykład głównie dlatego aby wskazać, że posługiwanie się porównaniem procentowym nie zawsze jest oczywiste.
  4. Strona 24 (rys. 6). Warto podpisać co przedstawiono w części a i b rysunku. Co przedstawia pionowa kratownica narysowana linią przerywaną?
  5. Strona 82, punkt 1 „Zastosowanie kompozytów FRP przyczynia się do wzrostu nośności elementów wzmocnionych, a także ugięcia i czasu potrzebnego do zniszczenia”. Jest to spory skrót myślowy (użyty również w wielu innych miejscach rozprawy), który jest trudny do zaakceptowania. Ugięcia zazwyczaj porównuje się przy tej samej sile (tutaj

Autor rozprawy myśli inaczej), a jeśli mówimy o czasie to warto byłoby określić czy podczas badania zastosowano sterowanie siłą czy przemieszczeniem, i jak ustalono prędkości przyrostu (siły lub przemieszczenia).

6. Strona 88 i 133 (wzory (1) i (27)) – podane są dwa różne wzory na (tę samą?) wielkość z dwóch różnych norm; ta kwestia powinna być dokładnie omówiona – co kryje się w każdym z tych równań, a co nie zostało uwzględnione, i dlaczego te równania są inne.
7. Pewną niedoskonałością wyników przedstawionych w rozprawie jest to, że niektóre wielkości (moduł sprężystości, wytrzymałość na zginanie) zostały wyznaczone dla elementów wzmocnionych tak, jakby to były elementy jednorodne. Według mnie jest to zgodne ze wzorami z normy (dotyczącej elementów jednorodnych), ale niezgodne z zasadami mechaniki. W przypadku wzmocnienia zapewne mamy przesunięcie osi obojętnej przekroju.
8. W jaki sposób interpretować wyniki przedstawione na wykresie nr 14 (strona 152)? Nachylenie wykresów jest bardzo różnorodne; można wyróżnić dwie grupy wyników.
9. Strona 171 punkt 4 – Autor podał relacje dotyczące nośności i sztywności wzmocnianych belek, jednak nie podjął próby wyjaśnienia zaobserwowanych relacji. Wydaje się, że te relacje są zgodne z intuicją inżynierską.
10. Strona 210, tab. 11. W tabeli podano spadek nośności (niestety w procentach) belek serii G w porównaniu do odpowiadającym wartościom serii A. Wartość siły niszczącej serii G można też znaleźć na wykresie 30 (str. 204). Według mnie nie ma spadku nośności dla serii G w stosunku do serii A, bo siła niszcząca dla serii A wynosiła 10,13 kN, a wszystkie wartości na wykresie 30 są wyższe. Gdyby wyniki serii G były niższe niż A, to oznaczałoby, że temperatura rzędu 60°C wyraźnie obniżyła nośność samego drewna.
11. Stosowane w rozprawie pojęcie sztywności zostało zdefiniowane bardzo późno (strona 213, równanie (31)). Jest ono poprawne jeśli występuje liniowy związek pomiędzy przyrostem siły i przyrostem przemieszczenia. Zasadne wydaje się pytanie o przyjmowany zakres (sił lub przemieszczeń) do obliczenia sztywności M.

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

## 5. Wnioski końcowe recenzji

Podsumowując recenzję stwierdzam, że Pan mgr inż. Piotr Sokołowski w rozprawie doktorskiej „Analiza pracy statycznej zginanych belek drewnianych wzmocnianych siatką z włókna PBO”:

- zrealizował cel rozprawy,
- wykazał techniczną możliwość wykonania wzmocnienia oraz zbadał efektywność zaproponowanej metody wzmocnienia,
- wykazał się umiejętnością samodzielnej pracy badawczej, znajomością literatury światowej i bogatą wiedzą w dziedzinie prowadzenia badań doświadczalnych,
- uzyskał oryginalne rezultaty naukowe dotyczące zachowania się belek drewnianych wzmocnianych kompozytami wykonanymi z siatki PBO zatopionymi w matrycy żywicznej lub mineralnej.

Rozprawę oceniam pozytywnie. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazała umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych i wysoką wiedzę teoretyczną Pana mgra inż. Piotra Sokołowskiego.

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, prof. PP  
Poznań, 07.01.2022 r.