

Prof. dr hab. inż. Mieczysław Kuczma  
Instytut Konstrukcji Budowlanych  
Politechnika Poznańska  
ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań

Poznań, 8.09.2017r.

kom.: 662 14 00 73  
e-mail: mieczyslaw.kuczma@put.poznan.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr. inż. Konrada RODACKIEGO

**pt.: Nośność belek zespolonych drewniano-szklanych poddanych obciążeniom  
wielokrotnie zmiennym**

**Podstawa opracowania:**

Powołanie na recenzenta przez Radę Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej;  
pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej – prof. PK dr. hab.  
inż. Andrzeja Szaraty, datowane 24.04.2017r.

**1. Przedmiot i ogólna charakterystyka pracy**

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgra Konrada Rodackiego są badania doświadczalne i symulacje komputerowe innowacyjnego rozwiązania konstrukcyjnego, jakim są dwuteowe drewniano-szklane belki zespolone. Przeprowadzone analizy oraz eksperymenty laboratoryjne dotyczą głównie wyznaczenia wpływu obciążeń wielokrotnie zmiennych na sztywność i nośność badanych belek zespolonych o szklanym środniku i drewnianych pasach połączonych podatnym klejem poliuretanowym. Z architektonicznego punktu widzenia szkło jest materiałem bardzo atrakcyjnym i szeroko stosowanym w budownictwie na elementy ozdobne (niekonstrukcyjne). Zastosowanie szkła jako materiału konstrukcyjnego wymaga ostrożności i specjalnych zabiegów z uwagi na dużą kruchość szkła oraz niską jego wytrzymałość na rozciąganie w porównaniu do wytrzymałości na ściskanie. Potrzeba ustaleń normatywnych, popartych badaniami doświadczalnymi i analizami statyczno-wytrzymałościowymi dla



konstrukcyjnych zastosowań szkła jest widoczna. Praca doktorska Konrada Rodackiego wychodzi naprzeciw tym potrzebom.

Pozytywnie już tutaj należy ocenić bogate badania doświadczalne Doktoranta, których wyniki przyczyniają się w sposób wyraźny do poszerzenia wiedzy w dziedzinie zachowania się drewniano-szklanych belek zespolonych poddanych obciążeniom quasi-statycznym oraz wielokrotnie zmiennym. Badania laboratoryjne obejmowały trzy grupy testów: (1) szczegółowe badania materiałów użytych do budowy belek zespolonych: drewna, szkła i klejów poliuretanowych, (2) badania połączenia klejowego drewna ze szkłem, oraz (3) badania wytworzonych belek zespolonych. Dodatkowym atutem pracy jest uzupełnienie testów laboratoryjnych obliczeniami według modeli analitycznych oraz modeli numerycznych bazujących na metodzie elementów skończonych (MES). Na podkreślenie zasługuje także możliwość bezpośredniego wykorzystania rezultatów badań Autora w praktyce inżynierskiej.

Rozprawa liczy 170 stron, podzielona jest na 12 rozdziałów od Wprowadzenia do Spisu tablic poprzez Literaturę i Spis rysunków, oraz zawiera wykaz nazwany Stosowane symbole i oznaczenia, Streszczenie i Abstract (w j. ang.).

Układ pracy jest klarowny i logicznie poprawny. Praca zredagowana jest bardzo starannie (recenzent zauważył tylko nieliczne pomyłki edytorskie, które zamieszczono w Załączniku). Narracja Autora świadczy o Jego dużej pasji badawczej.

## 2. Opis i ocena pracy

W rozdziale 1., zatytułowanym *Wprowadzenie*, Autor uzasadnia wybór przedmiotu badań, formułuje 4 tezy pracy, oraz krótko określa zakres pracy, obejmujący przegląd literatury, badania doświadczalne, analizy numeryczne i analityczne badanego zagadnienia. Wymienia tu szczególne cele pracy wynikające z celu nadrzędnego, który formułuje następująco: „*Głównym celem pracy jest poszerzenie wiedzy na temat pracy zespolonych belek drewniano-szklanych poddanych obciążeniom wielokrotnie zmiennym. W pracy skupiono się na zachowaniu spoiny klejowej wykonanej z materiałów hipersprężystych w ścinanym połączeniu poddanym obciążeniu wielokrotnie zmiennemu, jako kluczowemu czynnikowi wpływającemu na stopień zespolenia elementu*”.

Doktorant stawia 4 tezy dotyczące zachowania się zespolonych belek drewniano-szklanych poddanych obciążeniu wielokrotnie zmiennemu:



Teza 1:

*„Nośność zmęczeniowa na zginanie zespolonych belek dwuteowych drewniano-szklanych, w których połączenie między środkiem a pasami wykonano z podatnego kleju poliuretanowego jest większa od wartości momentów wywołanych obciążeniem eksploatacyjnym, szacowanych na poziomie 40% nośności doraźnej belki.”*

Teza 2:

*„W zespolonych belkach dwuteowych drewniano-szklanych, w których połączenie wykonano z podatnego kleju poliuretanowego, osiągnięcie momentu niszczącego jest sygnalizowane dzięki nośności postkrytycznej (po wystąpieniu pierwszej rysy w szkłe).”*

Teza 3:

*„Kleje poliuretanowe stosowane do zespolenia szkła z drewnem cechują się wytrzymałością zmęczeniową większą od naprężeń wywołanych obciążeniem użytkowym.”*

Teza 4:

*„Pętle histerezy klejów poliuretanowych przy obciążeniach zmiennych w połączeniu ścinanym dochodzą do wartości asymptotycznej przy niewielkiej liczbie cykli obciążenia.”*

W rozdziale 2., *Uwagi ogólne na temat zmęczenia materiałów*, Autor przytacza pojęcia i warunki związane z problemem zmęczenia użytych materiałów (drewna, polimerów, szkła).

*Przegląd literatury*, rozdz. 3, stanowi szczegółowe omówienie prac zagranicznych i krajowych dotyczących zagadnień badawczych podjętych przez Doktoranta, również ze wskazaniem luk w dotychczasowych badaniach i oryginalnych elementów własnych badań.

W rozdziale 4., *Badania materiałów*, Doktorant omawia własne eksperymenty laboratoryjne na próbkach materiałów, z których wykonano belki zespolone, tj. drewna, poliuretanowego kleju (3 rodzaje) oraz szkła laminowanego. Próbki z zastosowanego drewna jodłowego poddano następującym pięciu próbom wytrzymałościowym, przeprowadzonym pod obciążeniem quasi-statycznym:

- próbie rozciągania wzdłuż włókien (6 próbek o wymiarach 20 x 20 x 350 mm),
- próbie osiowego ściskania równoległe do włókien (4 próbki 20 x 20 x 30 mm),
- próbie zginania trójpunktowego (6 próbek o wymiarach 20 x 20 x 300 mm),
- próbie rozciągania prostopadle do włókien (4 próbki o wymiarach 20 x 50 x 60 mm),
- próbie ścinania równoległe do włókien (4 próbki 20 x 30 x 50 mm).

Ponadto ustalana była gęstość i aktualna w czasie badania wilgotność drewna.

Badania wytrzymałości drewna w próbach rozciągania, ściskania, trójpunktowego zginania i ścinania polegały na jednorazowym obciążeniu quasi-statycznym z szybkością 100 N/s aż do zniszczenia próbki, przy sterowaniu prędkością przyrostu siły i zapisie mierzonych wartości z częstotliwością 1 Hz. Przemieszczenia mierzone były przesunięciem trawersy maszyny wytrzymałościowej (maszyna Zwick-Roel o wydajności 50 kN). Po zniszczeniu elementu zmierzono higrometrem wgłębnym wilgotność badanego elementu w pobliżu miejsca jego zniszczenia. Pomierzone wartości wytrzymałości i sztywności badanych próbek drewna były następnie korygowane ze względu na ich faktyczną, pomierzoną wilgotność. Przebieg i wyniki testów wytrzymałościowych Autor zobrazował na zdjęciach i wykresach jako zależność siła-przemieszczenie (wydłużenia/skrócenie/ugięcie) i zależność naprężenie-odkształcenie, rys. 4.9 – 4.18, oraz zestawiał wartości liczbowe tabelarycznie, tablice 4.1 – 4.6.

Zbadano trzy kleje poliuretanowe o różnej sztywności, od podatnego (Sika<sup>®</sup>PM) przez elastyczny (Sika<sup>®</sup>PS) po twardo-elastyczny (Sika<sup>®</sup>PT), w próbie ścinania podwójnego połączenia zakładkowego, w próbie osiowego rozciągania i ściskania, oraz w testach pull-off. Wyznaczono także twardości Shore'a użytych klejów poliuretanowych. Badane kleje wykazują termiczną odporność w przedziale temperatur od -40°C do +80°C. Próbę quasi-statycznego ścinania połączenia podwójnego zakładkowego przeprowadzono na 7 próbkach drewniano-szklanych (drewno jodłowe, szkło typu float) o wymiarach 50 x 60 x 170 mm i klejowej spoinie o grubości 2 mm. Ponadto, próbę ścinania połączenia podwójnego zakładkowego wykonano na 9 analogicznych próbkach drewniano-szklanych poddanych sterowanym przemieszczeniem obciążeniu wielokrotnie zmiennemu o minimalnej liczbie cykli 10 000 i częstotliwości 0,62 Hz, przy precyzyjnie tak dobranych amplitudach przemieszczeń, aby uzyskać odpowiednie wyężenie kleju (materiału spoiny), w przedziałach od -4% do +12% (zmienne znakowo obciążenie niesymetryczne), od -8% do +8% (obciążenie symetryczne), od 0% do +16% (jednoznakowe obciążenie niesymetryczne) wyężenia kleju, które wyznaczono na podstawie procedur projektowania belki zespolonej o rozpiętości 7 m. Testy przyczepności klejów do szkła i drewna przeprowadzono na 39 próbkach, różnicując sposoby przygotowania powierzchni. Próbki obciążano quasi-statycznie aż do zerwania, przy sterowaniu przemieszczeniem z szybkością 2 mm/min. Badania kleju w próbach quasi-statycznego ściskania i rozciągania miały na celu wyznaczenie parametrów modelu konstytutywnego zastosowanego kleju, który Doktorant przyjął w postaci modelu materiału hipersprężystego Mooney'a-Rivlina. Z uwagi na wrażliwość badanych klejów na szybkość odkształceń, badania przeprowadzono przy różnych szybkościach przyrostu odkształceń



( $10^{-2}/\text{min}$ ,  $10^{-1}/\text{min}$ ,  $10^0/\text{min}$ ,  $10^1/\text{min}$ ). Wyniki badań laboratoryjnych klejów zilustrowano zdjęciami i zestawieniami tabelarycznymi wartości liczbowych pomierzonych wielkości na rys. 4.32 – 4.47 i w tablicach 4.10 – 4.18.

Taflę szklaną (ogółem 9 szt.), laminowaną z dwóch warstw szkła sodowego typu float o wymiarach 6,68 x 170 x 3100 mm poddano quasi-statycznemu testowi czteropunktowego zginania w pozycji „na sztorc” (odległość między podporami 3000 mm), przy zabezpieczeniu przed zwichrzeniem trzema podporami (obejmami) bocznymi. Proces obciążania sterowany był przemieszczeniem z szybkością 2 mm/min, pomiary wykonano za pomocą tradycyjnych tensometrów oporowych i czujników przemieszczeń, oraz bezkontaktowej metody pomiaru optycznego. Badania posłużyły do wyznaczenia modułu sprężystości Younga i wytrzymałości szkła na rozciąganie przy zginaniu. Ilustracje z badań i otrzymane wyniki liczbowe podano na rys. 4.48 – 4.57 i tab. 4.20. Wyznaczona wartość wytrzymałości na rozciąganie szkła równa 36,82 MPa jest mniejsza niż podawana w literaturze (45 MPa), a wartość modułu sprężystości 69,27 GPa niewiele różni się od tej podawanej w literaturze (70 GPa).

W rozdziale 5., *Badania belek zespolonych dwuteowych drewniano-szklanych*, Autor przedstawia wyniki własnych badań laboratoryjnych wykonanych na 6 belkach o wymiarach 3100 x 220 x 70 mm. Pasy wykonano z drewna jodłowego o wymiarze przekroju porzecznego 40 x 70 mm, z wcięciem prostokątnym 17 x 10,68 mm na wklejenie szklanego środka o grubości 6,68 mm i dwustronnej spoiny klejowej (użyto elastyczny klej Sika®PS) o grubości po 2 mm. Szklany środek to szyba warstwowa składająca się z dwóch szyb, każda o grubości 3 mm, sklejonych podwójną warstwą folii PVB. Trzy belki zostały poddane próbie czteropunktowego quasi-statycznego zginania aż do zniszczenia, a pozostałe trzy belki były najpierw poddane obciążeniom wielokrotnie zmiennym, co najmniej 100 000 cykli obciążenie-odciążenie, a następnie były badane w próbie czteropunktowego quasi-statycznego zginania aż do zniszczenia. Za pomocą tensometrów i czujników liniowych mierzono odkształcenia w wybranych miejscach pasów drewnianych, szklanego środka, spoiny klejowej, oraz mierzono ugięcia belki; zastosowano także optyczny pomiar przemieszczeń szklanego środka belki ze stałą częstotliwością 1 s (lustrzanką cyfrową o rozdzielczości matrycy 16 Mpx). Aby zabezpieczyć belkę przed zwichrzeniem w trakcie badania, zastosowano dodatkowe podpory boczne symetrycznie umiejscowione względem przyłożonego obciążenia (środku belki). Obciążanie sterowane było przemieszczeniem z szybkością 2 mm/min. Zniszczenie belek obciążanych quasi-statycznie odbywało się w sposób ciągły i następowało wskutek przekroczenia wytrzymałości na ścinanie w spoinie



klejowej (przy odkształceniach rzędu od 10% do 30%), przy czym nawet po ścięciu klejowej spoiny belka nie uległa całkowitej dezintegracji, bo rozciągnięte pasy drewniane utrzymywały spękany szklany środek w całości. Pierwsze pęknięcia szkła środka pojawiały się, gdy największe odkształcenia kleju w spoinie między szkłem a drewnem były rzędu 8-10%. W przypadku belek poddanych najpierw obciążeniu wielokrotnie zmiennemu przez min. 100 000 cykli sterowanych siłą w zakresie od 0,7 kN do 2,4 kN z częstotliwością 0,62 Hz, zniszczenie belek miało podobny przebieg jak w grupie belek obciążanych tylko quasi-statycznie. Średnia wartość obciążenia powodującego pierwsze zarysowanie szkła środka belek obciążanych tylko quasi-statycznie to 6,38 kN, a belek uprzednio poddanych wielokrotnym obciążeniom cyklicznym – 6,94 kN (8,7% większe obciążenie), natomiast średnie wartości obciążenia niszczącego zespolone belki (nośności graniczne belek) były praktycznie takie same dla obu grup belek i wyniosły odpowiednio 16,22 kN i 16,25 kN. Trzeba tu dodać, że po badaniach zmęczeniowych nie zaobserwowano w wszystkich trzech badanych belkach widocznych makroskopowo uszkodzeń, co potwierdzają też wyniki pomiarów, np. zmiany odkształceń na końcu cyklicznych badań zmęczeniowych były w granicach dokładności pomiarów (1-2%). Przygotowanie belek do badań, przebieg badań i otrzymane wyniki pokazano na licznych rysunkach, rys. 5.1 – 5.39, i zestawiono w tablicach 5.1 – 5.6.

W rozdziale 6., *Model numeryczny podwójnego połączenia zakładkowego*, Autor koncentruje się na modelowaniu komputerowym ważnego zagadnienia jakim jest połączenie klejowe szkła i drewna. Dużo uwagi poświęca efektowi Mullinsa, który jest zjawiskiem charakterystycznym dla użytego kleju polimerowego, i do analizy jego wpływu wykorzystuje zależności zaprogramowane w programie ABAQUS. Stosuje dwa modele konstytutywne dla kleju: model hipersprężystego materiału Mooney'a-Rivlina i model materiału Hooke'a. Obliczenia wykonuje w pakiecie programów ABAQUS, który bazuje na dyskretyzacji przestrzennej rozpatrywanych zagadnień brzegowych metodą elementów skończonych. W modelu obliczeniowym uwzględniono osłabianie się materiału po przekroczeniu pewnej wartości naprężeń ścinających, co spowodowało, że rozwiązanie numeryczne zależy od gęstości siatki elementów skończonych (zagadnienie brzegowe traci swój pierwotnie eliptyczny charakter). Otrzymane wyniki symulacji numerycznych prowadzą Autora do konkluzji, że zaprogramowany w pakiecie ABAQUS model materiału z efektem Mullinsa nie jest w stanie właściwie odzwierciedlić zachowanie się użytych klejów polimerowych.

Rozdział 7, *Model zespolonej belki dwuteowej drewniano-szklanej*, zawiera wyniki rozległych analiz numerycznych za pomocą pakietu ABAQUS, w których zróżnicowano



modele konstytutywne i numeryczne ze względu na właściwości materiałów (energii pęknięcia) i parametry siatki elementów skończonych (typ elementu, gęstość siatki) oraz sposoby odwzorowania spoiny klejowej (różne grubości spoiny, w tym spoina o zerowej grubości jako elementy typu „interface”). Obliczenia pokazały, że modele z warstwą kleju typu „interface” prowadzą do rezultatów bliższych wynikom badań eksperymentalnych. Należy podkreślić, że uwzględnienie powstawania i rozwoju rys w szklanym środniku (model rys dyskretnych metodą XFEM) czyni to zagadnienie brzegowe jeszcze silniej nieliniowym. Przeprowadzone przez Doktoranta analizy potwierdzają fakt, że z uwagi na czas obliczeń i stabilność (dokładność) rozwiązań należy stosować możliwie proste modele obliczeniowe, pod warunkiem uwzględniania istotnych własności badanych obiektów i występujących w nich zjawisk.

W rozdziale 8., *Walidacja analityczna wyników*, Autor przedstawia analizę analityczną zespolonych belek drewniano-szklanych bazując na podejściu normowym (metoda gamma) i metodzie Pischla. Doktorant pokazuje, że obliczenia metodą Pischla dają wyniki zbliżone do rozwiązania numerycznego MES (ABAQUS) i wyników pomierzonych w eksperymentach laboratoryjnych.

*Podsumowanie*, stanowiące rozdział 9 pracy, zawiera zestawienie badań i zagadnień poruszonych w pracy oraz szereg wynikających z nich wniosków, jak również wskazuje na potrzeby i przedstawia propozycje dalszych badań w przyszłości.

Na marginesie chciałbym tu wspomnieć, że w literaturze światowej przyjęło się [zob. np. I. Babuska, J.T. Oden, *Verification and validation in computational engineering and science: basic concepts*, CMAME 19:3(2004) 4057-4066], że eksperymenty laboratoryjne służą do walidacji modeli matematycznych (modeli obliczeniowych i symulacji numerycznych), a nie odwrotnie jak pisze Autor na str. 124: „...w celu walidacji wyników badań doświadczalnych przeanalizowano dziewięć modeli numerycznych różniących się ...”; podobnie w tytule rozdziału 8.

Poddając ocenie badania laboratoryjne Doktoranta, na podstawie szczegółowej lektury pracy i wyżej przedstawionego jej zakresu i treści uważam, że na podkreślenie zasługują innowacyjny pomysł i oryginalność badań, szeroki zakres testów wytrzymałościowych, oraz wykazana duża samodzielność i pasja badawcza Autora. Doktorant sam wykonał wszystkie próbki materiałów do badań i był głównym wykonawcą zbadanych zespolonych belek drewniano-szklanych. Oceniam, że przygotowanie próbek i badania zostały przeprowadzone z



7

zachowaniem procedur badawczych, z dużą starannością i dbałością o szczegóły (np. wypolerowanie krawędzi szklanego średnika). Odnotować też należy fakt, że badania przeprowadzono w laboratorium Politechniki Krakowskiej – macierzystej jednostce Doktoranta.

Drewno jest materiałem trudnym do konstytutywnego modelowania i doświadczalnych badań ze względu na jego anizotropowość i niejednorodność, oraz wykazywany duży statystyczny rozrzut wartości badanych właściwości, który uwarunkowany jest czynnikami autogenicznymi i aktualnymi warunkami cieplno-wilgotnościowymi. Badania laboratoryjne Doktoranta potwierdziły złożoność zachowania się drewna jako materiału konstrukcyjnego. Otrzymane przez Doktoranta wyniki wytrzymałościowych badań laboratoryjnych wykazują charakterystyczny dla drewna statystyczny rozrzut, którego dobrą (względną) miarą jest współczynnik zmienności, przyjmujący małe wartości, rzędu 1% w przypadku wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien i towarzyszącego jej modułu sprężystości Younga, oraz wartości kilku procentowe (5 – 8%) w przypadku wytrzymałości na rozciąganie wzdłuż włókien i w poprzek włókien, także w trójpunktowym zginaniu (zarówno wytrzymałość na rozciąganie jak i strzałka ugięcia). Największą wartością współczynnika zmienności, rzędu 11%, obarczone są otrzymane wartości modułu Younga przy rozciąganiu wzdłuż włókien. Otrzymane wyniki uważam za dobrze odzwierciedlające faktyczne cechy wytrzymałościowe i mechaniczne badanego drewna. Badania Doktoranta potwierdziły fakt, że spoina klejowa (jej sztywność i wytrzymałość) istotnie wpływa na nośność belki zespolonej, wskazały też na degradujące działanie wielokrotnych obciążeń cyklicznych na połączenia klejowe w testach ścinania (redukcja nośności połączenia do 52% i sztywności rzędu 32%), które jednak nie ujawniło się w badaniach zespolonych belek.

Dokładna lektura pracy pobudza do analiz i rozważań, a w szczególności skłania także do postawienia dwóch następujących kwestii, które wymagałyby dodatkowego komentarza. Do badań zastosowano drewno jodłowe, o deklarowanej przez producenta klasie C22. Otrzymane przez Doktoranta wyniki badań doświadczalnych charakteryzują właśnie to drewno, które użył następnie do wykonania zespolonych belek, i dlatego zaskakująca jest konkluzja w stwierdzeniu Autora na str. 49: „Zgodnie z uzyskanymi wartościami modułu sprężystości badanego drewna można je zakwalifikować do klasy wytrzymałości C14 zgodnie z normą [97]. Posługując się wynikami badań gęstości drewna, która również może być traktowana jako wskaźnik klasy wytrzymałości drewna konstrukcyjnego, badane drewno można zakwalifikować do klasy C22 zgodnie z [97]. Dla celów dalszych analiz przyjęto parametry





odpowiadające klasie C22.”. Druga kwestia to stwierdzenie Autora, że badane drewno charakteryzuje się sprężysto-plastycznym zachowaniem, natomiast zamieszczone w pracy wykresy nie pokazują zachowania się drewna przy odciążaniu po przekroczeniu liniowości związku siła-przemieszczenie, tj. ze stanu przypuszczalnych odkształceń trwałych (sprężysto-plastycznych).

Chcę jednak wyraźnie zaznaczyć, że te obie powyższe uwagi nie obniżają mojej wysokiej oceny pracy, a mają raczej na celu zwrócenie uwagi na duży stopień trudności ocenianych badań i widoczną rzetelność Doktoranta w prezentacji ich wyników i w dalszych analizach rozpatrywanego problemu badawczego. Postawiony cel pracy i jej tezy uważam za spełnione.

Ważnym dopełnieniem eksperymentów laboratoryjnych, dodatkowym atutem badań Doktoranta, to zawarte w pracy modelowanie i analizy teoretyczne wraz z rozwiązaniami analitycznymi i wynikami obliczeń numerycznych. Doktorant pokazał, że zastosowany model materiału Mooney’a-Rivlina i uogólniony model Hooke’a należy traktować jako wstępne przybliżenie opisu złożonego zachowania się użytego kleju poliuretanowego, który wykazuje efekt Mullinsa i wrażliwość na szybkość odkształceń.

### 3. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra Konrada Rodackiego stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i potwierdza Jego wiedzę teoretyczną w dziedzinie mechaniki, spełnia tym samym wymóg art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Praktyczną użyteczność rozpatrywanej tematyki rozprawy i otrzymanych wyników oceniam wysoko. Wyniki badań doświadczalnych Doktoranta przyczyniają się w sposób wyraźny do poszerzenia wiedzy w dziedzinie zachowania się drewniano-szklanych belek zespolonych poddanych obciążeniom quasi-statycznym i wielokrotnie zmiennym. Autor pracy wykazał, że posiada rozległą wiedzę w zakresie badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki konstrukcji, modelowania teoretycznego i symulacji komputerowych.

Stawiam wniosek o przyjęcie pracy i dopuszczenie Kandydata do publicznej obrony i ubiegania się o stopień naukowy doktora w dyscyplinie *Budownictwo*.

Proponuję ponadto wyróżnienie Autora pracy za rozległe i kompleksowe własne badania doświadczalne, za ich oryginalność i otrzymane wyniki, które z pasją i rzetelnie przedstawił w pracy doktorskiej.



## Załącznik

Zauważone pomyłki edytorskie:

- str. 16: zamienić jedno  $\sigma_{max}$  na  $\sigma_{min}$  we wzorach na  $\sigma_m$  i  $\Delta\sigma$
- str. 34: nieprecyzyjne jest stwierdzenie „Wszystkie wymienione modele są trójparametrowymi modelami liniowo-lepko-sprężystymi.”
- str. 38: wzór (4.ii) na odkształcenia  $\varepsilon_T$  wymaga korekty, wzór (4.iv) jest zbędny (powtórzenie wzoru (4.ii))
- str. 42: „...zmierzeniu pomiarze z ....”
- str. 104 i dalsze w całej pracy: poprawić „...Mullina...” na „...Mullinsa...”

