

Warszawa, 02.09.2021 r.

Prof. dr hab. inż. Elżbieta Szmigiera
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Warszawska
Al. Armii Ludowej 16
00-637 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra. inż. Łukasza Polusa
„An Analysis of Load Bearing Capacity and Stiffness of Aluminium-Concrete Composite
Elements Subjected to Bending”

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi pismo prof. dr hab. inż. Jacka Pielechy, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Poznańskiej z dnia 09.07.2021 r., wynikające z postanowienia uchwały Rady Dyscypliny z dnia 06.07.2021.

Rozprawa doktorska będąca przedmiotem recenzji została przygotowana w Politechnice Poznańskiej, promotorem rozprawy był dr hab. inż. Maciej Szumigała, prof. PP.

1. Charakterystyka ogólna pracy

Rozprawa ma charakter badawczo-analityczny i liczy łącznie 165 stron. Praca złożona jest z siedmiu części podstawowych i trzech załączników. Praca zawiera w części podstawowej 91 rysunków (w tym zdjęć) oraz 23 tablice. Wykaz literatury obejmuje 307 pozycji, w tym normy i adresy stron internetowych. Wybranych z Bibliografii 16 pozycji, których współautorem jest mgr inż. Łukasz Polus, zostało dodatkowo umieszczonych na początku pracy. Rozprawa zawiera także wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń, brakuje natomiast zestawienia rysunków, zdjęć i tablic.

Część pierwsza, zatytułowana przez Autora Wstęp (Introduction), składa się z pięciu podrozdziałów. W rozdziale 1.1. (The motivation behind the work) Autor opisuje sposób uzyskiwania aluminium, a jako główną motywację podjęcia tematu pracy podaje potrzebę stosowania rozwiązań, umożliwiających późniejszy demontaż belek aluminiowo-betonowych, dzięki zastosowaniu odpowiednich łączników. W rozdziale 1.2, zatytułowanym Przegląd literatury (Literature review), Autor opisuje pierwsze zastosowania aluminium w belkach zespolonych, na przykładach konstrukcji mostowych. Ta część dysertacji w podrozdziale 1.3 zawiera także przedstawienie celu i tezy pracy. Sformułowano jedną tezę, dotyczącą możliwości zastosowania w tego typu belkach demontowalnych łączników. Postawioną tezę Autor uzupełnił o cztery pytania (research questions), na które odpowiedź planuje uzyskać w wyniku przeprowadzonych badań. W podrozdziale 1.4 Doktorant definiuje ograniczenia, które przyjął w swojej pracy badawczej. W tym miejscu brakuje szerszego uzasadnienia wymienionych ograniczeń. Zdaniem recenzenta, podrozdział 1.5 powinien być umieszczony wcześniej.

Druga i trzecia część pracy stanowi swoistą kontynuację opisu stanu wiedzy w zakresie ścinanych łączników i zespolonych belek aluminiowo-betonowych. W rozdziale 2 Autor opisał różne rozwiązania łączników i połączeń w belkach zespolonych, z uwzględnieniem stosowania belek

aluminiowych, a także przykłady łączników demontowalnych, również swojego współautorstwa. Rozdział 3 zawiera teoretyczną analizę współpracy aluminiowych belek z betonowymi płytami w przekrojach zespolonych.

W czwartej części pracy Autor zawarł opis własnych badań, zarówno doświadczalnych, jak i analiz numerycznych. W obu przypadkach, przedmiotem badań były demontowalne łączniki, a także zachowanie zginanych belek zespolonych aluminiowo-betonowych, w których wykorzystano proponowane rozwiązanie łączników. Badania poprzedzały testy cech materiałowych.

Część piąta dysertacji zawiera wyniki przeprowadzonych badań i analiz numerycznych, a także dyskusję nad uzyskanymi rezultatami. W tej części pracy Autor umieścił także wybrane wyniki badań cech mechanicznych materiałów, zastosowanych do wykonania elementów badawczych (tab. 5.2). W części 5, wyniki badań doświadczalnych i analiz numerycznych, związane z przeprowadzonym testem połączenia belki zespolonej na ścinanie i na zginanie są bogato ilustrowane rysunkami, zdjęciami i tabelami.

Część 6 pracy stanowi podsumowanie, w którym Autor odnosi się do postawionej w rozdziale pierwszym tezy i zadanych w nim pytań (research questions). Przewidywany kierunek dalszych badań opisano w rozdziale 7 dysertacji.

Praca doktorska zakończona jest trzema załącznikami.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

2.1. Dobór tematu, cel i teza rozprawy

Tematem pracy doktorskiej jest ocena możliwości stosowania pewnego rozwiązania demontowalnych łączników w belkach zespolonych aluminiowo-betonowych. Prace nad tym rozwiązaniem Autor prowadził już od wielu lat. W ich wyniku powstał nawet patent, którego współautorem jest Doktorant. W przedstawionej pracy doktorskiej, sprawdzenie przydatności tego rozwiązania przeprowadzono, opisując wykonane badania doświadczalne oraz analizy numeryczne w testach na ścinanie i na zginanie modeli belek zespolonych. Autor dokonał także weryfikacji modelu numerycznego na podstawie otrzymanych wyników doświadczeń.

Przedstawiony temat jest interesujący w swoim założeniu. Zdaniem recenzenta, celowe jest poszukiwanie nowych rozwiązań stropów i belek zespolonych, które prowadzą do eliminacji wad tych konstrukcji, umożliwiając zwiększenie zakresu ich stosowania. Zaletą proponowanego rozwiązania jest niewątpliwie zmniejszenie ciężaru konstrukcji, odporność na korozję w określonych warunkach stosowania, a także możliwość demontażu i wykorzystania belek poprzez recykling. Przedstawiony temat badań wpisuje się w obecny kierunek działań w budownictwie, związany z szeroko pojętym zrównoważonym rozwojem. Pewne ograniczenie stanowi problem, związany z bezpieczeństwem pożarowym konstrukcji, w której zastosowano aluminium w podstawowych elementach nośnych. Autor nie podjął tej tematyki w swojej rozprawie. W przeprowadzonych badaniach przyjął także inne ograniczenia. W przypadku testów, dotyczących nowego rozwiązania ścinanych łączników, były to:

rozmiar otworów, średnica łączników, moment skręcający i wymiary betonowych żeber. W odniesieniu do zespolonych belek aluminiowo-betonowych, zbadano cztery elementy poddane obciążeniu doraźnemu, o tej samej geometrii, wykonane z betonu tej samej klasy wytrzymałości i z tego samego rodzaju aluminium.

Celem pracy było uzyskanie wiedzy na temat lokalnego i globalnego zachowania pod obciążeniem doraźnym belek zespolonych aluminiowo-betonowych, z zaproponowanym własnym rozwiązaniem demontowalnych łączników. Postawiona przez Autora teza, dotycząca możliwości zastosowania w tego typu belkach demontowalnych łączników jest sformułowana bardzo ogólnie, nie dając możliwości udowodnienia jej w sposób wyczerpujący w ramach rozprawy doktorskiej. Dodatkowo, jest to trudne ze względu na przyjęcie przez Doktoranta pewnej ograniczonej liczby zmiennych parametrów, co jest zrozumiałe na tym etapie badań, ale jednocześnie uniemożliwia pełną ocenę zaproponowanego rozwiązania. Uzupelnienie tezy stanowiły „pytania badawcze” (research questions), postawione przez Autora dysertacji w podrozdziale 1.3., z których dwa (pierwsze i trzecie) wydają się być na zbyt ogólnym poziomie. Odpowiedź na nie jest niemożliwa do uzyskania w ramach pracy doktorskiej. Zatem Autor sam postawił przed sobą wymagania, trudne do spełnienia. „Pytaniami badawczymi” Doktorant wyznaczył sobie bardzo ambitnie zakres merytoryczny, który nie jest wymagany w ramach jednej dysertacji. Ograniczenia te, jakkolwiek nie pozwalają na szerokie uogólnienie wyników badań i analiz, są zrozumiałe w świetle możliwości technicznych i czasowych realizacji rozprawy. Pomimo tych ograniczeń, przedstawione analizy mają duże znaczenie, ponieważ prezentują warsztat badawczo-analityczny, który może być wykorzystywany przy rozwiązywaniu podobnych problemów naukowych. Stwierdzam zatem, że temat rozprawy można uznać za interesujący i przydatny, a sformułowany cel zawiera elementy naukowo-badawcze odpowiednie na poziomie doktorskim.

2.2. Ocena wartości naukowej rozprawy

Na wartość naukową rozprawy składają się obszerne badania doświadczalne, dotyczące dwóch podstawowych aspektów oceny pracy belek zespolonych: nośności na ścinanie podłużne i na zginanie. Autor opracował także model numeryczny badanych belek, który umożliwia prowadzenie dalszych, pogłębionych analiz. Wykazał też, że zastosowana metoda (zero-length spring) jest właściwa w przypadku modelowania zespolonych belek aluminiowo-betonowych. Wydaje się jednak, że Doktorant nie wykorzystał w pełni potencjału opracowanego przez siebie modelu numerycznego. Po jego zweryfikowaniu i wykazaniu zgodności z wynikami badań doświadczalnych, Autor skupił się w rozważaniach na ocenie wpływu różnych parametrów (wymiaru siatki, przyjęte elementy skończone) na stopień tej zgodności. Zdaniem recenzenta, można było w większym stopniu wykorzystać opracowany model numeryczny do poszerzenia analizy podmiotowej belki o elementy, które nie były badane w ramach testów doświadczalnych.

Przeprowadzone badania laboratoryjne zostały przez Autora opisane dokładnie i przejrzysto. Zachowanie badanych elementów zostało zbadane w dwóch testach. Pierwszy to test nowego

rozwiązania łączników na ścinanie, który został przeprowadzony w celu sprawdzenia ich sztywności i nośności a także ciągliwości. Drugie podstawowe badanie dotyczyło zginania belki zespolonej, wykonanej z tych samych elementów, co w poprzednim teście i przy zastosowaniu tego samego typu łączników. W tej samej sekwencji, co badania doświadczalne, przeprowadzono także analizę numeryczną. Kolejnym etapem była weryfikacja uzyskanego modelu.

Wyniki własnych badań i analiz zostały opisane przez Autora w interesujący sposób, poprzez dyskusję i porównanie z rezultatami, uzyskanymi przez innych badaczy. Na przykład, w rozdziale 5.2 dokonano bardzo wnikliwej analizy zachowania zespolonego połączenia badanej belki i czynników wpływających na sztywność i nośność nowego rozwiązania łączników. Ciekawe obserwacje uzyskano w wyniku zdemontowania elementu badawczego, pozwoliło to na dokładne określenie miejsc lokalnego uplastycznienia belki i stalowego profilu, a także zarysowania betonu. W przypadku testu na zginanie belki zespolonej, interesującym i wartościowym efektem przeprowadzonych badań są dane zebrane w tablicy 5.5., które jednoznacznie wskazują na to, że „słabym ogniwem” rozwiązania jest w tym przypadku wytrzymałość aluminium. Moment, odpowiadający powstaniu uplastycznienia belki aluminiowej ma w każdym przypadku wartość najmniejszą, w stosunku do momentu rysującego beton czy momentu odpowiadającego zniszczeniu przekroju zespolonego. Czy Autor dysertacji uwzględni ten fakt w swoich dalszych badaniach?

Główne osiągnięcia Autora rozprawy w moim przekonaniu to:

- opracowanie nowego typu łączników demontowalnych (uzyskanie patentu) i sprawdzenie ich przydatności do stosowania w zespolonych belkach aluminiowo-betonowych; przeprowadzenie dokładnych analiz zachowania tych belek, umożliwiających dalszą pracę nad udoskonaleniem zaproponowanego rozwiązania belki,
- opracowanie i weryfikacja modelu numerycznego zespolonych belek aluminiowo-betonowych,
- sprawdzenie możliwości zastosowania metody „zero-length spring” do modelowania łączników ścinanych.

3. Uwagi krytyczne do pracy

3.1. Uwagi merytoryczne

Uwagi ogólne

W pracy Doktorant zawarł obszerne wyniki swoich badań doświadczalnych i analiz numerycznych, dotyczących zastosowania łączników demontowalnych w belkach zespolonych aluminiowo-betonowych. Mimo, w większości bardzo szczegółowych opisów, merytoryczny odbiór pracy utrudniają niektóre tytuły rozdziałów (np. wspomniany wcześniej tytuł rozdz. 4), czy kolejność podawanych informacji. Wyniki badań cech materiałowych umieścił Autor dopiero w rozdziale 5. Zdaniem recenzenta te dane powinny być umieszczone wcześniej, w rozdziale 4, gdyż nie są to wielkości, stanowiące cel badań, jedynie wyniki pośrednie, niezbędne do modelowania numerycznego, opisanego właśnie w rozdziale 4. Zastosowany przez Autora układ wymaga od czytelnika swoistego

„poszukiwania” danych podczas zapoznawania się z treścią tego rozdziału. Mylące są także podane klasy wytrzymałości betonu, z których wykonano elementy badawcze. Autor napisał, że do badań użyto betonu towarowego. W składzie mieszanki podanym przez producenta (zał.1) jest napisane, że beton jest klasy C35/45, natomiast w treści rozprawy na str. 43 podano, że zastosowano beton klasy C50/60 (slabs/beams -), a w przypadku badań łączników – C30/37. Rzeczywiście, takie klasy można otrzymać, analizując wyniki z badań wytrzymałości betonu, zawarte w rozdziale 5, w tab. 5.2. Brak jasnej informacji utrudnia merytoryczne śledzenie treści rozprawy.

Autor przeprowadził w szerokim zakresie badania cech mechanicznych betonu: wytrzymałość na ściskanie (na próbkach walcowych i sześciennych), wytrzymałość na rozciąganie, moduł sprężystości i współczynnik Poissona. Recenzent nie znalazł jednak wytłumaczenia, dlaczego, poza wytrzymałością na ściskanie, pozostałe cechy były badane w długim czasie po wykonaniu próbek (f_{ct} – 269 dni po betonowaniu, E_{cm} – 314 dni, podobnie jak współczynnik Poissona)? Z treści rozprawy wynika, że badania elementów wykonano po 100-192 dniach od betonowania. Zatem okres ten nie ma związku z badaniami wytrzymałości na rozciąganie i modułem sprężystości betonu.

Autor, opisując metodykę badań na ścinanie łączników, powołuje się na załącznik B.2. Eurokodu 4 stwierdzając, że badania zostały wykonane zgodnie z tym załącznikiem. W punkcie B.2.3 tego załącznika jest sformułowane zalecenie, by każda z płyt była betonowana w pozycji horyzontalnej. W rozprawie Autor podkreśla natomiast, że w badaniach własnych, płyty były betonowane w pozycji pionowej. Intencją Doktoranta było wykonanie identycznych płyt, natomiast betonowanie w poziomie zapewnia uzyskanie tych samych warunków wykonania płyt, jakie panują na budowie.

Część pracy, poświęcona opisowi przeprowadzonych obliczeń numerycznych jest merytorycznie nieuporządkowana, kolejność rozdziałów dotyczących MES i informacje w nich zawarte nie są do końca przemyślane. Wydaje się, że na ten fragment dysertacji negatywny wpływ miało bezpośrednio odnoszenie się (kompilacja?) do artykułów, których Autor był współautorem. Na przykład, trudno jest się zorientować, jakie dokładnie modele kryją się pod oznaczeniami FEA1, 2, 3, itd.

W analizie MES Doktorant zastosował standardowe podejście dotyczące modelowania betonu w programie Abaqus, za pomocą modelu CDP, który z zadowalającą dokładnością odwzorowuje zachowanie betonu nieskrępowanego. Bardzo interesujące jest natomiast podejście do modelowania łączników. Autor nie modeluje ich jako zatopionych w betonie, tylko używa łączników zastępczych, zbudowanych z obliczeniowej sprężynki o zadanej odpowiedzi. Można to nazwać całkowym podejściem do modelowania łączników, gdzie cała odpowiedź łącznika jest skumulowana w predefiniowanej krzywej siła-poślizg (np. rysunek 4.18). Autor używa programu Abaqus/Standard z niejawnym schematem całkowania równań, co powoduje czasem duże problemy ze zbieżnością rozwiązania, jednakże autor takową zbieżność uzyskał.

Zawarte w Conclusions wnioski nie są satysfakcjonujące. Autor nie wykorzystał potencjału, jaki dały mu wyniki badań, szczególnie opracowany model numeryczny. Sposób sformułowania tezy, a

następnie „research questions”, w założeniu oryginalny, wpłynął na ograniczenia w możliwości skonstruowania odpowiedzi. Autor, chcąc odpowiedzieć na umieszczone wcześniej pytania, ograniczył te odpowiedzi do, czasami, zbyt ogólnych stwierdzeń, nie wynikających bezpośrednio z otrzymanych rezultatów badań. Z kolei opracowany i zweryfikowany model numeryczny posłużył Doktorantowi głównie do analizy wpływu przyjętych parametrów na zgodność z wynikami badań laboratoryjnych. Uwagi zamieszczone w rozdziale *Future research* świadczą o tym, że Autor zdaje sobie sprawę z przyjętych ograniczeń i prawidłowo określa kierunki przyszłych badań. Doktorant nie podał natomiast obszarów, gdzie widziałby zastosowanie proponowanych rozwiązań w konstrukcji. Zalety stosowania zespolonych belek aluminiowo-betonowych opisał na podstawie konstrukcji mostowych (rozd. 1).

Uwagi szczegółowe

Uwagi szczegółowe zostaną przedstawione w kolejności, odpowiadającej układowi i numeracji rozprawy:

- **str.11** - jakie znaczenie i sens ma, według Autora, cytowanie w kontekście „fire resistance”, artykułu z 2007 roku autorstwa recenzenta, dotyczącego słupów zespolonych stalowo-betonowych; w cytowanym artykule nie zajmowano się tą problematyką; zdaniem recenzenta, większą wartość merytoryczną miałyby przytoczenie monografii, autorstwa E. Szmigiera, M. Niedośpiał, B. Grzeszykowski, której tematyka dotyczy projektowania zginanych elementów zespolonych stalowo-betonowych,
- **str. 26** - czuje się pewien niedosyt, z powodu braku rysunków, pokazujących opisywane rozwiązania łączników,
- **str. 29** - brakuje wytłumaczenia/rozwinięcia, dlaczego akurat takie łączniki badano i stosowano w przypadku belek aluminiowych,
- **str. 29/30** – Doktorant nieco „skrótowo” potraktował rozdział 2.2.; odczuwalny jest brak szczegółowych informacji,
- **str. 37** – brakuje rysunku z oznaczeniami, który ułatwiłby śledzenie obliczeń matematycznych,
- **str. 43** – tytuł Części 4 rozprawy *Materials and methods* jest zbyt lapidarny, wręcz wprowadzający czytelnika w błąd; Autor powinien wyraźniej zaznaczyć w nim, że ten rozdział dotyczy opisu badań własnych, zastosowanych materiałów i metod badawczych; co oznacza słowo „beams” w nawiasie, przy opisie klas wytrzymałości betonu, zastosowanego w badaniach? Czy chodzi o belkę wspomnianą na str. 58?
- **str. 45** – brak jest informacji o składzie betonu; wyjaśnienie można znaleźć dopiero w dalszej części rozprawy
- **str. 49** – brakuje odniesienia do rysunku 4.7., pokazującego schemat badania ścinanych łączników,
- **str.49** – Doktorant opisuje sposób wykonania autorskich łączników, między innymi, wymienia czynność, związaną ze spawaniem nakrętek; czy Autor brał pod uwagę wpływ procesu spawania na cechy materiałowe łączników?,

- **str. 51** –w wybranym elemencie badawczym, pomiędzy belką aluminiową i stalą umieszczono elementy gumowe, uwzględniając w ten sposób możliwą korozję aluminium w zetknięciu ze stalą; nie jest jednak napisane, w którym z badanych elementów; dopiero z podanych wyników w rozdz. 5.2/str.85 można się domyśleć, że chodzi o element nr 4; informacja w sposób jawny podana jest dopiero na str.91,
- **str. 57** - w opisie rys. 4.10 napisano o 3 tensometrach, mierzących odkształcenie belki, a na rysunku zaznaczono cztery (A1-A4) – dwa (A3 i A4) znajdują się na dolnej półce; symetryczne rozmieszczenie byłoby korzystniejsze, szczególnie na półkach,
- **str. 61** – wzory, dotyczące definicji prawa wzmocnienia/osłabienia betonu w strefie ściskanej (4.8, 4.9 i 4.10) oraz rozciąganej (4.13,4.14 o 4.15) pochodzą wprost z Manual Abaqus, zatem powoływanie się na publikację (Kmieciak and Kamiński 2011) jest zbędne,
- **str. 61** – wielkości D_c i D_t w powyższych wzorach są zapisane jak liczby, tymczasem są to tensory/wektory (dane wejściowe),
- **str. 65/tab. 4.3** – występują te same wielkości w dwóch kolumnach (podobnie jest na str. 74/tab. 4.8 i str. 75/tab. 4.9),
- **str. 68** - Autor stosuje całkowite podejście do modelowania łączników ścinanych (patrz rysunek 4.18); jednakże na str. 76 Autor wspomina o dodaniu do modelu „oddzielnych” łączników, zbudowanych z elementów bryłowych (widać je na rysunku 4.26); jest to niezrozumiałe, wymaga stosownego wyjaśnienia, w tekście nie można go znaleźć,
- **str. 90** – Autor przedstawił przykłady możliwości wykonania testu na ścinanie w inny sposób niż ten, opisany w EC4 (ze względu na trudność uzyskania zniszczenia przez ścięcie łączników); czy Autor zamierza przeprowadzić taki test?
- **str. 104** – brakuje komentarza Autora po informacjach podanych pod tab. 5.9,
- **str. 108/rys. 5.22** – na rysunku można zauważyć wręcz niespotykaną zgodność wyników MES z doświadczeniem; wymaga to wyjaśnienia,
- **str. 108/rys. 5.22** - Autor używa algorytmu Newtona-Raphsona do rozwiązywania zadań numerycznych; jednakże w wynikach modelowania testu push-out Autor otrzymuje opadającą odpowiedź konstrukcji; oznacza to, że sterowanie musiało zostać zrealizowane za pomocą wymuszonego przemieszczenia, gdyż tylko w takim przypadku otrzymana się opadające ścieżki równowagi przy zastosowanym algorytmie; jeżeli sterowanie było „siłowe”, to Autor musiałby użyć algorytmu Riksa albo Chrisfielda; niezbędnym jest wyjaśnienie,
- **str 114** – może warto by bardziej szczegółowo opisać model, oznaczony FEA5, skoro ma najlepszą zgodność z wynikami laboratoryjnego testu na zginanie,
- **str 115** – Autor przedstawia porównanie wyników, uzyskanych dla belki nr 1 i średnich ze wszystkich badanych belek? Dlaczego?

3.2. Uwagi redakcyjne i językowe

Rozprawa jest napisana w j. angielskim. Styl tekstu jest przejrzysty, jasny i zrozumiały.

Uwagę zwraca zastosowana przez Doktoranta forma, która jest miejscami połączeniem rozprawy doktorskiej i „przewodnika”, stosowanego w przypadku, gdy podstawą przewodu doktorskiego jest cykl artykułów. Recenzent ma na myśli dodatkowe zestawienie artykułów współautorstwa Doktoranta, umieszczone na początku rozprawy. Wymienione tam pozycje znajdują się także w Bibliografii na końcu rozprawy. Często też wybrane artykuły, których współautorem jest Doktorant, są przywoływane na początku rozdziału (napisane kursywą). Czemu służy taki układ dysertacji? Niektóre tytuły i podtytuły rozdziałów są zbyt lakoniczne lub są myląco sformułowane, np. tytuł podrozdziału 1.4 (*Limitations*), czy wymieniony wcześniej tytuł rozdziału 4.

Autor przyjął szereg oryginalnych rozwiązań, które stanowią ułatwienie w zapoznawaniu się z treścią rozprawy przez czytelnika. Do takich rozwiązań należy podanie w umieszczonym na początku rozprawy wykazie skrótów i oznaczeń, numerów stron, na których po raz pierwszy występują te oznaczenia, a także zamieszczenie w Bibliografii numerów stron, na których dana pozycja literaturowa jest zacytowana. Tablice wykonane są w większości czytelnie, przejrzyste, stanowią źródło wielu interesujących informacji, zebranych w logiczny sposób. Pomocne są także komentarze, zamieszczone na końcu niektórych tablic, choć nie zawsze są w stanie zastąpić brak odpowiednich informacji w tekście. Należy podkreślić bardzo dobrą jakość zdjęć, rysunków i wykresów.

Autor nie ustrzegł się jednak popełnienia pewnych błędów, czy niedopatrzeń. Poniżej kilka wybranych przykładów:

- **str. 29 i 31** - Autor powołuje się na swój artykuł (2019b), w bibliografii nie ma odniesienia do tych stron,
- **str.9/10** – Doktorant wymienia zalety stosowania zespolonych belek aluminiowo-betonowych, forma poszczególnych punktów jest niespójna,
- **str. 31** – niewłaściwy i niezrozumiały sposób cytowania (pierwsze zdanie akapitu drugiego); można zrozumieć, że pozycja (Polus and Szumigala 2019b) dotyczy zespolonych belek drewniano-betonowych,
- **str. 102/104** – w tytułach tablic 5.6 i 5.9 powinno być słowo „calculation” (tak jak w tab. 5.7),
- **str 107-109** – brakuje odwołania do tab. 5.10, przy omawianiu kolejnych analiz FE. Tabela jest dopiero na str.113
- **str. 129** – wszystkie pozycje w Bibliografii są umieszczone razem, według alfabetu, bez wydzielenia, np. norm, co utrudnia wyszukiwanie innych pozycji, niż artykuły czy monografie.

4. Wniosek końcowy

Recenzja ocenianej rozprawy zawiera szereg uwag krytycznych. Jednakże należy stwierdzić, że jednocześnie Doktorant wykazał się dużą wiedzą teoretyczną w dyscyplinie budownictwo (obecnie *inżynieria lądowa i transport*), opanował umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i przedstawił rozwiązanie problemu naukowego. Wykazał umiejętność planowania i przeprowadzenia

badan doświadczalnych oraz wykorzystał dostępne narzędzia obliczeniowe do analizy złożonych zagadnień konstrukcyjnych.

Rozdziały dysertacji są napisane w sposób logiczny i w miarę przejrzysty, choć Autor nie ustrzegł się szeregu błędów, które zostały opisane powyżej.

Na pozytywne podkreślenie zasługuje ponadto dorobek publikacyjny Doktoranta, obejmujący łącznie 16 różnego rodzaju publikacji, a także fakt, że jest współautorem patentu.

W świetle powyższego stwierdzam, że mgr inż. Łukasz Polus wykazał odpowiednie przygotowanie oraz umiejętność prowadzenia pracy naukowej, a recenzowana praca doktorska pt. „An Analysis of Load Bearing Capacity and Stiffness of Aluminium-Concrete Composite Elements Subjected to Bending” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim, zawarte w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o tytule i stopniach naukowych (Dz.U. nr 65 poz. 595). Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Łukasza Polusa do publicznej obrony.

E. Szumińska