Prof. dr hab. inż. Jacek Gołaszewski
Politechnika Śląska
Wydział Budownictwa
Katedra Procesów Budowlanych i Fizyki Budowli
ul. Akademicka 5
44-100 Gliwice

Gliwice, 07.05.2024

Opinia o rozprawie doktorskiej mgr inż. Anety Skoratko pt.: Kompozyty cementowe zbrojone przestrzennymi elementami plastikowymi wykonanymi za pomocą druku 3D.

1. Wprowadzenie

Przedmiotem opinii jest rozprawa doktorska mgr inż. Anety Skoratko pt. "Kompozyty cementowe zbrojone przestrzennymi elementami plastikowymi wykonanymi za pomocą druku 3D". Jej promotorem jest dr hab. inż. Jacek Katzer, prof. UWM, specjalista w zakresie inżynierii materiałów budowlanych, a szczególnie technologii betonu. Opinia została opracowana zgodnie z Uchwałą nr 26 Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie z dnia 12 marca 2024 wyznaczającej mnie na recenzenta w przewodzie doktorskim p. mgr. inż. Anety Skoratko.

2. Ocena zasadności i istotności podjętej tematyki

Rosnące wymagania inwestorów, architektów i konstruktorów, konieczność spełnienia wymagań zrównoważonego budownictwa, brak siły roboczej i pogarszające się prognozy demograficzne sprawiają, że współczesne budownictwo intensywnie poszukuje nowych rozwiązań materiałowych i technologicznych. Dotyczy to szczególnie żelbetu, który jest obecnie podstawowym i uniwersalnym materiałem konstrukcyjnym. Technologia wykonania konstrukcji z żelbetu (czyli betonu wzmocnionego zbrojeniem w postaci prętów) wymaga dużych nakładów pracy i nie jest podatna na ew. robotyzację i automatyzację. Posiada również ograniczenia utrudniające architektom i konstruktorom projektowanie elementów i obiektów o skomplikowanych kształtach. Wśród wielu obecnie testowanych kierunków rozwoju technologii betonu (żelbetu) najistotniejsze wydają się te, które dotyczą: (1) opracowania nowych rozwiązań materiałowych, w tym stosowania materiałów z recyclingu i zbrojenia rozproszonego w betonie jako alternatywy dla zbrojenia tradycyjnego z prętów (co m. in. może umożliwić drukowanie elementów konstrukcyjnych z betonu), (2) stosowania druku 3D z betonu do wykonania elementów konstrukcji, (3) stosowania drukowanych deskowań traconych (głównie z betonu, ale również z tworzyw sztucznych) do wykonywania elementów o skomplikowanych kształtach oraz (4) stosowania elementów zbrojenia betonu o złożonych, niekonwencjonalnych kształtach, wykonywanych w technologii druku 3D. Wdrożenie tych rozwiązań może istotnie zwiększyć zakres i potencjał stosowania konstrukcji z betonu oraz stworzyć warunki do robotyzacji i automatyzacji procesu ich wykonania. Ww. kierunki rozwoju wciąż jednak wymagają intensywnych badań, w tym w zakresie rozpoznania właściwości mechanicznych nowych materiałów (kierunek 1) i elementów hybrydowych (kierunki 3 i 4), w stopniu umożliwiającym ich bezpieczne projektowanie oraz wykonanie w technologii druku 3D (kierunek 2). W swojej pracy Doktorantka dokonuje oceny możliwości stosowania elementów drukowanych z tworzywa

sztucznego ABS do wykonania podstawowych elementów konstrukcyjnych z betonu – słupów i belek. Odnosi się przy tym przede wszystkim do kwestii kształtowania właściwości mechanicznych elementów betonowo plastikowych składających się z: (1) betonu (niezbrojonego lub zbrojonego włóknami stalowymi) stanowiącego wypełnienie deskowania traconego z tworzywa sztucznego (o różnych, typowych i skomplikowanych, w tym fraktalnych kształtach) wykonanego w technologii druku 3D i przenoszącego naprężenia rozciągające oraz (2) betonu i przestrzennego zbrojenia z tworzywa sztucznego wykonanego w technologii druku 3D. Tematykę podjętą przez Doktorantkę uważam za aktualną i ważną z punktu widzenia rozwoju technologii betonu. Zakres analiz i badań jest zasadny, tak ze względów poznawczych, jak i praktycznych, choć w tym drugim przypadku w dalszej perspektywie.

3. Charakterystyka pracy

Doktorantka przedstawiła rozprawę doktorską w formie spójnego tematycznie opracowania. którego zasadniczą część stanowi cykl 6 publikacji naukowych. Rozprawa składa się ze streszczenia po polsku i angielsku, wykazu oznaczeń i skrótowców, 8 rozdziałów, bibliografii oraz spisu rysunków i tabel. Integralną częścią pracy są załączniki, w których umieszczono publikacje stanowiące osiągnięcie naukowe Doktorantki wraz z jej i współautorów oświadczeniami o wkładzie w ich powstanie.

W rozdziale 1 - Wskazanie osiągnięć naukowych, Doktorantka wskazała cykl publikacji obejmujący 6 artykułów jako osiągnięcie naukowe stanowiące rozprawę doktorską. W skład tego cyklu wchodzą następujące artykuły (numeracja wg rozdziału 1, omówiłem je jednak w kolejności wynikającej z programu badawczego przedstawionego w rozdziale 2):

[A2] **Skoratko A.**, Katzer J.: Harnessing 3D Printing of Plastics in Construction - Opportunities and Limitations, Materials, 14 (16) (2021). doi.10.3390/ma14164547.
IF - 3,748, punktacja MEiN – 140 pkt.

> W artykule przedstawiony szeroki przegląd najnowszych osiągnięć w druku 3D tworzyw sztucznych dla budownictwa. Szczególną uwagę zwrócono w nim na możliwości i ograniczenia wynikające z zastosowania do elementów z betonu drukowanego zbrojenie przestrzennego i deskowań traconych z tworzywa sztucznego. Ze względu na ocenianą rozprawę doktorską szczególne znaczenie mają wnioski z analizy stanu wiedzy stanowiące podstawę do przyjęcia kierunków i celów badań własnych.

[A5] **Katzer J.**, Skoratko A.: Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Dedicated for Casting Columns with Fractal Based Cross-sections (2023) – Referat wygłoszony na NTCC, Brno, 25-28 czerwca 2023, pełna wersja artykułu oczekuje na publikację w Trans Tech Publications, pełna wersja referatu załączona do pracy.

> Przedstawione w artykule program badawczy dotyczył optymalizacji składu i właściwości kompozytu (zaprawy) zbrojonej włóknami stalowymi przeznaczonej do wykonania elementów (słupów) betonowo plastikowych w traconych deskowaniach z tworzyw sztucznych o skomplikowanych kształtach. Wykorzystanie druku 3D z tworzyw sztucznych umożliwia łatwe tworzenie przekrojów, które nie są możliwe do osiągnięcia przy użyciu tradycyjnych technik szalunkowych. Za względu na skomplikowany kształt deskowań (form) mieszanka musiała spełniać wymagania dużej płynności i stabilności, założono również stosowanie od włókien stalowych w ilości od 0,5% do 2,0%. Pożądane właściwości zaprawy uzyskano poprzez optymalizację ilości superplastyfikatora i stabilizatora. W artykule przedstawiono również badania właściwości mechanicznych elementów betonowo plastikowych o przekroju kołowym, kwadratowym i pięciokątnym. Stwierdzono, że ilość włókien stalowych w badanym zakresie w niewielkim stopniu wpływa na właściwości mechaniczne zaprawy, pewną poprawę uzyskuje się przy 2,0% dodatku.

Badania te posłużyły do wytypowania zapraw stosowanych w badaniach elementów betonowo plastikowych i zbrojonych przestrzennym zbrojeniem plastikowym.

[A1] Katzer J., **Skoratko A.**: Concept of Using 3D Printing for Production of Concrete-Plastic Columns with Unconventional Cross-Sections, Materials, 14 (6) (2021). doi.10.3390/ma14061565.
IF - 3,748, punktacja MEiN – 140 pkt.

W artykule przedstawiono koncepcję oraz określono charakterystykę obciążeniowo-odkształceniową słupów betonowo plastikowych o różnych przekrojach. Techniką 3D wydrukowano tracone deskowania plastikowe o siedmiu różnych przekrojach, reprezentujących trzy typy kształtów słupów: najczęściej spotykane, rzadkie oraz niemożliwe do zrealizowania przy użyciu tradycyjnych deskowań (opartych na fraktalach). Deskowania (formy) z tworzywa sztucznego wypełniono zaprawą cementową pełniącą rolę zwykłego betonu. Wykazano, że słupy betonowo plastikowe charakteryzują się pod obciążeniem zachowaniem quasi-plastycznym. Przeanalizowano również wpływ kształtu deskowań traconych na wytrzymałość i wytrzymałość resztkową słupów. Wykazano, że największą wytrzymałością na ściskanie charakteryzują się słupy przekroju kołowym, a wytrzymałością resztkową słupy o przekroju fraktalnym. Jako obiecujący kierunek rozwoju koncepcji elementów betonowo plastikowych wskazano zastosowanie betonu zbrojonego włóknami stalowymi.

[A3] Katzer J., **Skoratko A.**: Using 3D printed formworks for the creation of steel fibre reinforced concrete-plastic columns, Construction and Building Materials, 337 (27) (2022).
doi. 10.1016/j.conbuildmat.2022.127586.
IF - 7,693 , punktacja MEiN - 140 pkt.

[A6] Katzer J., **Skoratko A.**, Seitl S.: Properties of steel fiber reinforced mortar-plastic columns with the cross-section in a form of a Cesaro fractal, Structural Concrete, 2023. doi.10.1002/suco.202300146.
IF - 3,200, punktacja MEiN - 100 pkt:

W artykułach [A3] i [A6], stanowiących kontynuację i rozwinięcie badań przedstawionych w [A1] przedstawiono i zweryfikowano koncepcję słupów betonowo plastikowych z wzmocnionych włóknami stalowymi. [A3] i [A6] obejmują podobny zakres badań. W [A3] badano słupy o kształtach przekroju analogicznych jak w [A1] (7 rodzajów), w [A6] słupy o innych, fraktalnych kształtach. W obu badaniach wykorzystano kompozyt (zaprawę) zbrojony włóknami stalowymi. Potwierdzono, że słupy betonowo plastikowe charakteryzują się pod obciążeniem zachowaniem quasi-plastycznym. Wyznaczono i przeanalizowano zależność obciążenie - odkształcenie dla słupów o różnym przekroju (w [A3] i [A6] zakres maksymalnego ugięcia był różny). Stwierdzono, że elementy o przekroju fraktalnym charakteryzują się mniejszą wytrzymałością na ściskanie, ale większą wytrzymałością resztkową i energią zniszczenia od elementów o przekroju okrągłym oraz większą jednorodnością i powtarzalnością tych właściwości. Uznano, że słupy betonowo plastikowe o przekroju kwadratowym są mniej przydatne, ze względu na gwałtowny przebieg zniszczenia i małą wytrzymałość. Słupy o fraktalnym kształcie przekroju charakteryzują się bezpiecznym przebiegiem zniszczenia, co powinno być przydatne przy tworzeniu konstrukcji poddanych obciążeniom dynamicznym. W obu artykułach przeanalizowano prawdopodobny mechanizm współpracy deskowanie – beton w elementach podczas ich obciążenia.

[A4] **Skoratko A.**, Szatkiewicz T., Katzer J., Jagoda M.: Mechanical properties of mortar beams reinforced by gyroid 3D printed plastic spatial elements, Cement and Concrete Composites, 134 (2022).
doi.10.1016/j.cemconcomp.2022.104809.
IF – 9,930, Punktacja MEiN – 200, udział własny: 25%

W artykule przedstawiono koncepcję i badania belek zbrojonych przestrzennymi elementami z tworzywa sztucznego. W prowadzonym programie badań zastosowano jako zbrojenie 4 rodzaje gyroid drukowanych z tworzywa sztucznego o różnych parametrach przestrzennych. Stwierdzono, że zastosowanie zbrojenia w postaci różnych gyroid umożliwia kształtowanie quasi-plastycznej charakterystyki wytrzymałości na zginanie elementów z kompozytu cementowego (zaprawy). Zachowanie mechaniczne badanych elementów jest podobne do zachowania fibrobetonów oraz elementów betonowo plastikowych (tracone deskowanie plastikowe jako otulina elementu). Przedyskutowano mechanizm współpracy zaprawa – przestrzenne elementy zbrojenia. Wskazano na kierunki dalszych badań.

Ogólnie można stwierdzić, że cykl publikacji stanowi spójne dzieło naukowe, w skład którego wchodzą zaplanowane i konsekwentnie zrealizowane analizy i badania. Włączone w skład cyklu publikacje stanowią układ przyczynowo – skutkowy, będąc sekwencją zagadnień badawczych ukierunkowanych na osiągnięcie jednoznacznie określonego w rozdziale 2 celu naukowego. Należy podkreślić, że 5 artykułów wchodzących w skład cyklu zostało opublikowanych w uznanych czasopismach posiadających IF. Łączny IF publikacji wynosi 28,319. Publikacje te są cytowane, co wskazuje na ich pozytywny wkład do stanu wiedzy.

Wszystkie publikacje w cyklu są współautorskie. Współautorem jest zawsze promotor, a w dwóch przypadkach występują jeszcze inni współautorzy. Współautorzy wyrazili zgodę na przedłożenie tych artykułów przez Doktorantkę jako część rozprawy doktorskiej. Wkład merytoryczny Doktorantki w przygotowanie publikacji cyklu został określony w poszczególnych artykułach oraz w znajdujących się w załączniku oświadczeniach Doktorantki i współautorów. Zwykle polegał on na: opracowaniu koncepcji naukowej, opracowaniu metodologii, oprogramowaniu, walidacji i wykonaniu badań, opracowaniu wyników badań, przygotowaniu merytorycznym i formalnym artykułów do publikacji. Analiza treści publikacji w kontekście wkładu Doktorantki w ich powstanie pozwala na stwierdzenie, że powstały one w wyniku wspólnych działań Doktorantki i Promotora, w których rola Doktorantki była wiodąca.

W rozdziale 2 – Cel i zakres pracy - Doktorantka sformułowała tezy pracy i cel pracy, którym jest udowodnienie tych tez:

(T1) Elementy plastikowe wykonane za pomocą druku 3D nadają się do zastosowania jako deskowania tracone słupów betonowych i fibrobetonowych.

(T2) Elementy plastikowe wykonane za pomocą druku 3D nadają się do zastosowania jako zbrojenie wewnętrzne belek betonowych.

(T3) Możliwe jest kształtowanie cech mechanicznych elementów wykonanych z kompozytów cementowych za pomocą elementów przestrzennego zbrojenia plastikowego.

W celu udowodnienia ww. tez Doktorantka przyjęła program badawczy składający się z następujących działań:

- Analiza stanu wiedzy w zakresie druku 3D z tworzyw sztucznych dla budownictwa, w tym szczególnie niekonwencjonalnego zbrojenia przestrzennego oraz drukowanego deskowania traconego.
- Badania własne w zakresie wpływu drukowanego deskowania traconego o różnych kształtach na wybrane właściwości elementów (słupów) betonowych i fibrobetonowych.
- Badania własne w zakresie wpływu przestrzennego zbrojenia plastikowego na wybrane właściwości elementów (belek) betonowych.

Ogólnie tezy i cel badań oceniam pozytywnie, przy czym tezy dotyczące możliwości stosowania elementów z tworzyw sztucznych (T1, T2) są sformułowane w sposób dość ogólny, pożądane byłoby jednoznaczne sformułowanie kryterium stanowiącego o możliwości stosowania elementów z tworzyw sztucznych w konstrukcjach betonowo plastikowych.

W rozdziale 3 - Przegląd stanu wiedzy, rozdziale 4 - Druk 3-D betonu, metali i tworzyw sztucznych – przegląd literatury oraz w artykule [A2] Doktorantka przedstawia, w oparciu o szeroką bazę literaturową rozważania ogólne w zakresie obecnej roli druku 3D w budownictwie, zakresu jego dotychczasowego zastosowania, możliwości, ograniczeń oraz kierunków rozwoju druku 3D w budownictwie. W przeglądzie literatury poruszono również kwestie wymagań w zakresie składu mieszanek betonowych do druku 3D, z nacisk na betony zbrojone włóknami. Doktorantka skoncentrowała się na zagadnieniach strategicznych, mniej uwagi poświęcając kwestiom kształtowania właściwości materiałów do druku i technologii druku. Jest to uzasadnione tematyką pracy, w której w zasadzie wstępnie weryfikowane są koncepcje hybrydowych rozwiązań materiałowych. Wnioski z analizy stanu wiedzy zawiera przede wszystkim artykuł [A2]. Analizę i ocenę stanu wiedzy należy uznać za wystarczającą, pozwalającą na sformułowanie wniosków dotyczących stanu wiedzy w obszarze tematyki doktoratu oraz wynikających z nich potrzeb i kierunków dalszych badań i analiz. Trzeba zauważyć, że Doktorantka ma skłonność do formułowania kategorycznych opinii w kwestiach dyskusyjnych i problematycznych, np. „większość prac badawczych w dziedzinie inżynierii lądowej koncentruje się obecnie na betonie drukowanym w 3D" (na jakiej podstawie tak sądzi?), „technologia druku 3D budynków i konstrukcji betonowych rozwija się najszybciej i daje niemal nieograniczone możliwości" (zakres stosowania druku 3D w budownictwie jest niewielki, głównie ze względu na bariery techniczne, technologiczne i ekonomiczne ograniczające możliwości jego stosowania).

W rozdziale 5 - Materiały i projekt eksperymentu Doktorantka przedstawiła szczegółowe założenia i plan badań, określiła czynniki zmienne w badaniach (rodzaj elementu, kształt deskowań traconych z tworzyw sztucznych, rodzaj przestrzennego zbrojenia drukowanego, rodzaj wypełnienia betonowego (zaprawa cementowa bez włókien, zaprawa cementowa z włóknami)) oraz właściwości materiałów, w tym właściwości filamentu. Rozdział ten stanowi syntezę informacji szczegółowych przedstawionych w poszczególnych artykułach [A1][A3][A4][A5][A6]. Założenia i plan badań jest właściwy, pozwala na osiągnięcie założonych celów pracy. Pewne kwestie wymagają jednak wyjaśnienia. Jaka była motywacja przyjęcia zapraw o składzie normowym? Ze względu na stosunkowo małą ilość zaczynu zaprawy te są dość trudne do upłynnienia, zwłaszcza po dodaniu włókien. Wytrzymałość badanych zapraw jest przy tym niewielka, czym Doktorantka to tłumaczy? Przyjęto grubość deskowania traconego 0,8 mm – czym było to motywowane? Szkoda też, że w badaniach nie różnicowano grubości deskowania traconego. Właściwości ABS zależą od parametrów procesu druku. Czy wszystkie wykorzystane w badaniach elementy drukowano w tych samych warunkach (prędkość druku, temperatura, wysokość warstwy, itp.)? Czy zmienne warunków druku elementów z tworzywa sztucznego może mieć istotny wpływ na właściwości elementów betonowo plastikowych? Dlaczego w badaniach stosowano brytyjskie wersje norm EN a nie polskie?

W rozdziale 6 - Wyniki i dyskusja – Doktorantka przedstawiła wyniki badań własnych i ich dyskusję. Rozdział otwiera zwięzła charakterystyka zastosowanych metod badań. Następnie Doktorantka syntetycznie omówiła wyniki badań w zakresie: (1) właściwości zapraw zbrojonych włóknami stalowymi przeznaczonych do wykonywania słupów o skomplikowanych kształtach [A5], (2) wpływu kształtu plastikowych deskowań traconych na właściwości słupów betonowo plastikowych o niekonwencjonalnych przekrojach [A1], (3) wpływ kształtu plastikowych deskowań traconych na właściwości mechaniczne słupów betonowo plastikowych o niekonwencjonalnych przekrojach wypełnionych zaprawą zbrojoną włóknami stalowymi [A3] [A5], (4) właściwości mechanicznych belek zbrojonych elementami przestrzennymi z tworzywa sztucznego wydrukowanymi w 3D [A4]. Rozdział ten pozostawia pewien niedosyt. Doktorantka przedstawiła w nim streszczenia poszczególnych publikacji w języku polskim, brakuje natomiast uogólnionej dyskusji i wniosków, w tym np. zasadności

stosowania zbrojenia rozproszonego w postaci włókien w kontekście technicznym i ekonomicznym. Ponadto nasuwa się szereg kwestii dyskusyjnych. Czy Doktorantka rozważała, jakie obciążenia od parcia bocznego mieszanki jest w stanie przenieść drukowane deskowanie tracone z ABS? Jaka w związku z tym będzie musiała być jego grubość w warunkach rzeczywistych? Próbki betonowo plastikowe przechowywano w sposób uniemożliwiający odparowanie wody, a więc mógł zachodzić jedynie skurcz autogeniczny. Czy zachodzący w dłuższym czasie skurcz wysychania zaprawy może wpływać na właściwości mechaniczne elementów betonowo plastikowych?

Rozprawę kończą rozdziały: 7– Uwagi końcowe i wnioski – oraz 8 – Dalsze plany badawcze. Treść tych rozdziałów jest problematyczna. Należy zaznaczyć, że wnioski z etapów badań, wykazujące osiągnięcie postawionego w rozdziale 2 celu pracy, znajdują się w publikacjach wchodzących w skład cyklu. Do tych wniosków, o charakterze tak ogólnym, jak i szczegółowym Doktorantka w rozdziale 7 w zasadzie nie nawiązuje. Charakter wniosku ogólnego ma ostatni akapit, niezbyt szczęśliwie przy tym sformułowany. Doktoranta pisze: „…na podstawie rezultatów można dowieźć (uwaga: powinno być dowieść, dowieźć oznacza bowiem: dostarczyć coś wioząc), że postawione trzy tezy badawcze znalazły potwierdzenie w zaprezentowanych i opisanych wynikach.”. Odczytując literalnie, Doktorantka stwierdza, że tezy nie tyle zostały udowodnione, ale dopiero będzie je można udowodnić. Poza tym w rozdziale 7 Doktorantka przedstawia, i to z licznymi odniesieniami literaturowymi ogólne i dość swobodne rozważania, w zasadzie tożsame z tymi które zawarto w rozdziałach 3 i 4. Bez szkody dla pracy, a nawet z pożytkiem dla niej, rozważania te można było pominąć. Również w zakresie dalszych kierunków badań więcej pożytecznych informacji przedstawiono w poszczególnych artykułach. Bez wątpienia dalsze badania powinny być kontynuowane z wykorzystaniem większych elementów betonowych, uwzględniać wpływ właściwości elementów drukowanych z tworzywa sztucznego, obejmować wpływ temperaturowy na zachowanie się elementów betonowo plastikowych itd. Proponowany w rozdz. 8 kierunek badań jest natomiast dyskusyjny i nie wydaje się być najbardziej obiecującym.

Literatura cytowana w rozprawie (uwzględniając cytowania w cyklu publikacji) obejmuje ponad 150 pozycji, w większości opublikowanych w języku angielskim i po 2010 roku. Jest ona w wystarczająca ze względu na sformułowany cel i zakres pracy.

Pod względem redakcyjnym publikacje wchodzące w skład cyklu oczywiście nie budzą zastrzeżeń. Natomiast tekst rozprawy w języku polskim jest problematyczny i trudny w odbiorze. W tekście są liczne błędy językowe, edycyjne oraz określenia potoczne i slangowe, np.: szalunek (powinno być: deskowanie albo urządzenia (systemy) formujące, świeża mieszanka betonowa lub świeży beton (powinno być: mieszanka betonowa), wylewanie mieszanki betonowej/betonu (powinno być: układanie mieszanki betonowej), czysta matryca cementowa, najbardziej gęsta konsystencja mieszanki (powinno być np. najmniej płynna mieszanka), itp.

4. Osiągnięcia rozprawy oraz uwagi dyskusyjne

Jako najważniejsze elementy oryginalne i osiągnięcia rozprawy uważam:

- Przedstawienie i doświadczalne zweryfikowanie koncepcji wykorzystania w elementach z betonu - słupach i belkach - konstrukcyjnych elementów z tworzywa sztucznego ABS drukowanych w technologii 3D jako: (1) deskowanie tracone wspomagające przenoszenie obciążeń lub (2) wewnętrzne zbrojenie przestrzenne;
- Określenie wpływu kształtu deskowań traconych z tworzywa sztucznego ABS wytworzonych w technologii 3D na właściwości mechaniczne słupów z betonu (zaprawy) bez zbrojenia i ze zbrojeniem rozproszonym, w zakresie pozwalającym na wskazanie rozwiązań o największym potencjale wytrzymałościowym;

- Określenie wpływu zbrojenia przestrzennego z tworzywa sztucznego ABS wytworzonego w technologii 3D na właściwości mechaniczne belek z betonu (zaprawy);
- Wykazanie, że elementy betonowo plastikowe (z deskowaniem traconym lub ze zbrojeniem przestrzennym z ABS) w fazie zniszczenia charakteryzują się zachowaniem quasi-plastycznym;
- Poszerzenie stanu wiedzy w zakresie kształtowania właściwości zapraw i betonów z dodatkiem włókien stalowych.

Zrealizowany program badań pozwolił przy tym na stworzenie bazy i wytyczenie kierunków do dalszych badań, których efektem powinna być technologia wykonania elementów betonowo plastikowych wraz z wytycznymi do obliczeń takich elementów. Zachęcam Doktorantkę do kontynuowania takich badań.

Szczegółowo najistotniejsze zagadnienia problematyczne i dyskusyjne przedstawiłem w części 3 opinii. Zaznaczam, że nie pomniejszają one w sposób zasadniczy wymienionych osiągnięć pracy. Podczas obrony proszę Doktorantkę o ustosunkowanie się również do następujących zagadnień:

- Tworzywo sztuczne ABS i beton (zaprawa) charakteryzują się odmiennymi współczynnikami rozszerzalności termicznej. Czy i jak może to wpływać na właściwości elementów betonowo plastikowych i współpracę na styku beton – tworzywo sztuczne? Czy zmiany temperatury otoczenia w typowym dla naszego klimatu zakresie mogą istotnie wpływać na właściwości mechaniczne ABS? Jeśli tak, to jak to może wpływać na zakres stosowania elementów betonowo plastikowych?
- Przedstawione badania stanowią przede wszystkim weryfikację potencjału technologii wykonaną na elementach modelowych. Ze względu na wykorzystanie małych próbek ich wyniki, choć obiecujące, wymagają walidacji na większych elementach. Doktorantka to dostrzega, ponieważ w podsumowaniu większości artykułów pada stwierdzenie o konieczności kontynuacji badań na dużych próbkach z betonu. Jakich różnic pomiędzy zachowaniem się małych i dużych elementów betonowo plastikowych można się spodziewać? Jaka powinna być grubość elementów deskowań traconych w przypadku większych elementów?
- Jak Doktorantka ocenia potencjalną trwałość elementów betonowo plastikowych (drukowane deskowanie z ABS) w różnych warunkach oddziaływania środowiska?

5. Wniosek końcowy

Doktorantka mgr inż. Aneta Skoratko wystarczająco rozpoznała potrzebny jej obszar wiedzy, właściwie sformułowała problem naukowy, cele badań oraz zrealizowała je w zakładanym stopniu. Wykazała dobrą wiedzę w zakresie dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport (w szczególności w zakresie technologii betonu), umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz umiejętność rozwiązania postawionego problemu naukowego.

W związku z tym, biorąc również pod uwagę wymienione w pkt. 4 opinii najistotniejsze osiągnięcia rozprawy oraz krytyczne i dyskusyjne uwagi merytoryczne stwierdzam, że rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r., poz. 742 z późniejszymi zmianami). Stawiam więc wniosek o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

