dr hab. inż. Mirosław Wesołowski, prof. PK
Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji
Politechnika Koszalińska
Ul. Śniadeckich 2,
75-453 Koszalin
Tel. +48 508 092 891
E-mail: miroslaw.wesolowski@tu.koszalin.pl

Koszalin, 05.06.2024

Recenzja
rozprawy doktorskiej (tytuł w j. polskim)
„ Kompozyty cementowe zbrojone przestrzennymi elementami plastikowymi wykonanymi za pomocą druku 3D"
i tytuł w j. angielskim
„Cement composites reinforced by spatial plastic elements created by 3D-printing"
autorstwa mgr inż. Anety Skoratko

1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi pismo od Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, dr. hab. inż. Jacka Rapińskiego, prof. UWM i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr inż. Anety Skoratko pt. *„Kompozyty cementowe zbrojone przestrzennymi elementami plastikowymi wykonanymi za pomocą druku 3D"*. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Jacek Katzer, prof. UWM.

2. Omówienie pracy

Recenzowana rozprawa doktorska została napisana łącznie na 183 stronach maszynopisu formatu A4. Składa się ona z: streszczenia w j. polskim i j. angielskim, wykazu skrótów i oznaczeń, i następujących rozdziałów: (1) Wskazanie osiągnięć naukowych; (2) Cel i zakres pracy; (3) Przegląd stanu wiedzy; (4) Druk 3-D betonu, metali i tworzyw sztucznych – przegląd literatury; (5) Materiały i projekt eksperymentu; (6) Wyniki i dyskusja; (7) Uwagi końcowe i wnioski; (8) Dalsze plany badawcze; (9) Literatura; (10) Spis rysunków i tabel. Ponadto, do rozprawy doktorskiej dołączono w formie załączników kopie sześciu opublikowanych artykułów naukowych stanowiących rozprawę doktorską wraz z oświadczeniami autorów.

W niniejszej dysertacji Autorka podjęła się bardzo aktualnych zagadnień związanych z zastosowaniem technologii wytwarzania przyrostowego (druk 3D) w budownictwie. W kontekście recenzowanej rozprawy doktorskiej Autorka proponuje wykorzystanie druku 3D tworzyw sztucznych do zastosowań budowlanych, jako niekonwencjonalne zbrojenie wewnętrzne i szalunek tracony pełniący funkcję zbrojenia zewnętrznego. Autorka słusznie uzasadnia prowadzone badania podnosząc takie kwestie, poza kwestiami ściśle wytrzymałościowymi, jak zrównoważone wytwarzanie, recykling tworzyw sztucznych,

redukcja kosztów procesów technologicznych związanych z prefabrykacją betonu, zwiększenie wydajności. Recenzent z pełnym uznaniem dla powyższych kwestii, uznaje jednak, że istotnym i kluczowym wkładem w rozwój dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport, jest próba wykazania quasi-plastycznego zachowania słupów i belek betonowych zbrojonych strukturami wytwarzanymi przyrostowo. W tym celu Doktoranta zdefiniowała następujące tezy badawcze:

1. Elementy plastikowe wykonane za pomocą druku 3D nadają się do zastosowania jako szalunek tracony słupów betonowych i fibrobetonowych.
2. Elementy plastikowe wykonane za pomocą druku 3D nadają się do zastosowania jako zbrojenie wewnętrzne belek betonowych.
3. Możliwe jest kształtowanie cech mechanicznych elementów wykonanych z kompozytów cementowych za pomocą elementów przestrzennego zbrojenia plastikowego.

Dla potwierdzenia postawionych tez Doktorantka przedstawiła sześć artykułów (A1 do A6), przy czym każdy artykuł przedstawia oddzielne zadanie doktorskiego programu badawczego. Zadania te można streścić następująco:

- Opis technologii druku 3D przy wytwarzaniu niekonwencjonalnych zbrojeń przestrzennych (A2);
- Dobór matrycy cementowej (A5);
- Koncepcja słupów betonowo - plastikowych z matrycą cementową pełniącą rolę zwykłego betonu z zastosowaniem zróżnicowanych przekrojów poprzecznych szalunków wykonanych z tworzywa sztucznego w procesie druku 3D (A1);
- Badania słupów betonowo - plastikowych zbrojonych włóknami stalowymi z zastosowaniem zróżnicowanych przekrojów poprzecznych szalunków wykonanych z tworzywa sztucznego w procesie druku 3D (A3,A6);
- Badania elementów belkowych zbrojonych przestrzennymi elementami wykonanych z tworzywa sztucznego w procesie druku 3D (A4).

Autorka rozpoczyna dysertację od zaprezentowania obszernego przeglądu literatury dotyczącej druku 3D z betonu, metali i z tworzyw sztucznych, zorientowanych na zastosowania w budownictwie. Autorka wykazuje, że druk 3D może zminimalizować zależność branży budowlanej od czynnika ludzkiego, przyczyniając się to do zwiększenia produktywności oraz poprawy zdrowia i bezpieczeństwa pracowników budowlanych. Jednocześnie wskazuje duży

potencjał dla stosowania zarówno szalunków (tradycyjnych i fraktalnych) oraz zbrojeń wykonanych z tworzyw sztucznych techniką przyrostową.

Kolejno, Autorka przedstawia dwustopniowy plan eksperymentu doboru matrycy cementowej przeznaczonej do wypełniania kolumn fraktalnych i skomplikowanych zbrojeń przestrzennych wykonanych w technologii druku 3D. Opracowano dwa rodzaje matryc: matrycę bez włókien oraz matrycę z dodatkiem włókien stalowych. Obie matryce zmodyfikowano dwoma domieszkami: superplastyfikatorem (MC PowerFlow EVO 508) i stabilizatorem (MC Centrament VMA 2). Udział procentowy domieszek określono na podstawie projektu eksperymentu ortogonalnego. Ostatecznie, dla potrzeb dalszych badań, ustalono wagowy udział procentowy jako 1.66% EVO i 1.66% VMA oraz 1% domieszki włókien stalowych. Kolejno, Autorka przedstawia koncepcję słupów betonowo - plastikowych. Prezentuje siedem różnych przekrojów szalunków słupów z tworzywa sztucznego wytworzonych techniką przyrostową FDM (Fused Deposition Modeling). Przekroje zaklasyfikowano do trzech typów tj., najczęściej spotykane, rzadkie oraz niemożliwe do zrealizowania przy użyciu tradycyjnych szalunków (opartych na fraktalach). W pierwszym etapie badań nad słupami betonowo – plastikowymi szalunki z tworzywa sztucznego wypełniono matrycą cementową pełniącą rolę zwykłego betonu. Przygotowane próbki badawcze poddano następnie próbie osiowego ściskania rejestrując krzywą obciążenie – odkształcenie. W drugim etapie badań Doktorantka rozszerza powyższe badania stosując matrycę cementową wzmocnioną włóknami stalowymi. Następnie Doktorantka prezentuje analogiczne badania z użyciem matrycy cementowej wzmocnionej włóknami stalowymi, skupiając się wyłącznie na pięciu kształtach przekroju poprzecznego słupa, w oparciu o iteracje fraktalne Cesaro. Całość powyższych badań zaplanowano tak, aby ograniczyć ilość zmiennych parametrów jedynie do kształtu przekroju i ilości tworzywa użytego do wydruku 3D. Podsumowując, stwierdzono, że im bardziej skomplikowany przekrój, tym bardziej uzyskiwano właściwości quasi-plastyczne badanych słupów betonowo - plastikowych. Dodatkowo, dla grupy szalunków opartych na fraktalach, uzyskano efekt tzw. zniszczenia sygnalizowanego (słupy nie ulegały całkowitemu zniszczeniu). Doktorantka słusznie zwraca uwagę na praktyczne zastosowanie powyższego zjawiska w sytuacji trzęsienia ziemi lub wybuchu, poprzez zwiększenie czasu niezbędnego do ewakuacji mieszkańców. Ponadto, istotnym efektem przeprowadzonych badań jest obliczenie wymaganej energii potrzebnej do zniszczenia badanego elementu. Parametr ten stanowi znaczne poszerzenie informacji o odpowiedzi badanych materiałów.

W końcowej części dysertacji Doktorantka prezentuje badania elementów belkowych zbrojonych przestrzennymi elementami z tworzywa sztucznego. Do tego celu wykonano serię testów trzypunktowego zginania belek. W prezentowanej dysertacji Autorka wytworzyła zbrojenia o geometrii gyroidów. Gyroidy te scharakteryzowano głównie na podstawie gęstości względnej (ρ*), przyjmując zakładając wartości 10%, 15%, 20%, 25%. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że właściwości badanych belek kompozytowych były wysoce quasi-plastyczne i zbliżone do właściwości betonu zbrojonego włóknami stalowymi. Ponadto, wykazano zróżnicowany charakter odpowiedzi badanych belek na podstawie układów spękań, które zależały od gęstości względnej gyroidu.

Po dokonaniu analizy wyników uzyskanych z badań empirycznych Autorka rozprawy sformułowała główne wnioski:

- Słupy betonowo - plastikowe charakteryzują się zachowaniem quasi-plastycznym podczas ostatecznego niszczenia, zwłaszcza te o szalunkach z przekrojami opartymi na fraktalach.
- Słupy betonowo – plastikowe pochłaniają dużą ilość energii przed zajściem zjawiska zniszczenia.
- Pozytywnie zweryfikowano koncepcje wykorzystania gyroidów wydrukowanych w 3D z tworzywa sztucznego jako zbrojenia belek betonowych, uzyskując zachowanie quasi-plastyczne przy zginaniu.

Recenzent ocenia, iż zaprezentowane badania w pełni potwierdzają założone tezy dysertacji.

Jak już wskazano na początku recenzji, rozprawa doktorska składa się z cyklu sześciu publikacji Doktorantki:

1. 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.
2. 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.
3. 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.

4. 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.

5. Katzer J., Skoratko A.: Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Dedicated for Casting Columns with Fractal Based Cross-sections (2023) – opublikowane w materiałach konferencyjnych NTCC, Brno, 2023.

6. 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.

Doktorantka przedkłada oświadczenia o jej wkładzie merytorycznym w poszczególnych wyżej wymienionych pracach. Oświadczenia te potwierdzają indywidualny i wiodący wkład Doktorantki w przygotowanie rozprawy doktorskiej. Wkład ten wyrażony jest następującymi aktywnościami:

- Ad. 1. Opracowanie koncepcji badawczej, opracowanie metodologii, oprogramowaniu, walidacji, wykonanie badań, zarządzanie danymi, pisanie manuskryptu (wersja oryginalna i korekta), wizualizacja.
- Ad. 2. Opracowanie koncepcji naukowej, opracowanie metodologii, oprogramowaniu, analizie formalnej, wykonanie badań, zarządzaniu, pisanie manuskryptu (wersja oryginalna i korekta), wizualizacja.
- Ad. 3. Opracowanie koncepcji badawczej, opracowanie metodologii, oprogramowaniu, walidacji, wykonanie badań, zarządzanie danymi, pisanie manuskryptu (wersja oryginalna i korekta), wizualizacja.
- Ad. 4. Opracowanie metodologii, przeprowadzenie badań laboratoryjnych, nadzór nad realizacją badań naukowych.
- Ad. 5. Opracowanie koncepcji badawczej, opracowanie metodologii, oprogramowaniu, walidacji, wykonanie badań, zarządzanie danymi, pisanie manuskryptu (wersja oryginalna i korekta), wizualizacja.
- Ad. 6. Opracowanie koncepcji badawczej, opracowanie metodologii, oprogramowaniu, walidacji, wykonanie badań, zarządzanie danymi, pisanie manuskryptu (wersja oryginalna i korekta), wizualizacja.

Recenzent nie wnosi do zaprezentowanych oświadczeń żadnych uwag.

Mgr inż. Aneta Skoratko jest współautorką łącznie **13** publikacji. Z tej bogatej listy publikacji **10** jest zarejestrowanych w bazie Scopus. Dane naukometryczne według bazy

Scopus to **111** cytowań z indeksem Hirsha wynoszącym **6** na dzień opracowania recenzji. Należy podkreślić, że jest to aktywność publikacyjna na poziomie znacząco przekraczającym wymagania stosownej ustawy przy składaniu rozprawy doktorskiej.

3. Pytania merytoryczne

Po zapoznaniu się z treścią całej rozprawy, recenzent chciałby otrzymać wyjaśnienia/odpowiedzi na następujące kwestie:

1. Proponowane przez Doktorantkę przekroje porzeczne szalunków charakteryzują się stałą grubością ścianki (1.6 mm) po wysokości. W treści rozprawy nie zawarto informacji z czego wynika powyższa wartość. Dodatkowo, przyjmując grubość ścianki przekroju należałoby uwzględnić wpływ ciśnienia hydrostatycznego ciekłego betonu działającego na szalunek, szczególnie w sytuacji tradycyjnego zalewania słupów lub kolumn. Proszę o informację na jakiej podstawie przyjęto wartość 1.6 mm oraz jakie jest stanowisko Doktorantki w temacie wpływu ciśnienia hydrostatycznego.
2. Doktorantka na stronie 46 rozprawy podaje „ *Na początku można założyć, że tylko rdzeń SFRC przenosi obciążenie. Szalunek z tworzywa sztucznego zaczyna działać, gdy odkształcenie słupa jest coraz większe.*". Według recenzenta powyższe zjawisko powinno mieć odzwierciedlenie w przebiegu krzywej obciążenie – odkształcenie, np. w zmianie kąta nachylenia krzywej w zakresie sprężystym. Recenzent zwraca się z prośbą o szersze uzasadnienie powyższego stwierdzenia.
3. W prezentowanej rozprawie Doktorantka przeprowadza badania na próbkach betonowych bez szalunku z tworzywa sztucznego, a uzyskane wyniki traktuje jako referencyjne. Zauważalny jest tutaj brak analogicznych badań dla wydrukowanych szalunków niewypełnionych matrycą. Badania takie niewątpliwe wzbogaciłyby merytorycznie treść rozprawy. Proszę o uzasadnienie braku powyższych badań.
4. W rozprawie doktorskiej nie podjęto się próby numerycznego prognozowania odpowiedzi pustych szalunków, słupów betonowo – plastikowych oraz belek kompozytowych. W sytuacji przyjęcia powszechnego fialmentu z ABS, dla którego dostępne są już modele materiałowe, symulacja numeryczna dostarczyłaby istotnych informacji o zachowaniu szalunku oraz proponowanych przez Doktorantkę zbrojeń z gyroidów. Proszę o uzasadnienie braku symulacji numerycznych.

4. Uwagi

Przedstawiona do oceny dysertacja ma klasyczny układ opracowania naukowego. Recenzowana rozprawa napisana jest na dobrym poziomie językowym z nieznacznymi błędami natury edytorskiej, które jednakże nie wpływają na jej wysoką ocenę jako całości.

Poniżej recenzent przedstawia kilka ogólnych uwag dotyczących treści rozprawy:

1. Celowym byłoby ujednolicenie nomenklatury dotyczącej filametu. Doktorantka naprzemiennie używa terminu „plastik", „tworzywo sztuczne" lub „polimer". W ocenie recenzenta termin „plastik" jest terminem zwyczajowym, więc stosowanie terminu „tworzywo sztuczne" wydaje się być bardziej zasadne z technicznego punktu widzenia.
2. Celowym byłoby ujednolicenie nomenklatury dotyczącej termin „słup". Doktorantka naprzemiennie używa terminu „słup", „filar" lub „kolumna". W ocenie recenzenta należałoby używać jednego terminu jednocześnie podając jego definicję z uwagi na charakterystyczne wymiary.
3. Doktorantka używa terminu „awaria" (np. strona 24, 41, 52 rozprawy). W ocenie recenzenta bardziej odpowiednim terminem jest „zniszczenie" lub „uszkodzenie".
4. Niezrozumiałe dla recenzenta jest użycie terminów „[...] zachowanie odkształceniowe lub odkształceniowo – utwardzalne [...]" (strona 52 rozprawy) – proszę o szerszy opis powyższych terminów.
5. Niezrozumiałe dla recenzenta jest sformułowanie „[...] wykazywały twardość przy odkształceniu." (strona 23 rozprawy) – proszę o szerszy opis powyższego sformułowania.
6. W treści rozprawy pojawiają się niespójne odwołania do rysunków. Doktorantka naprzemiennie używa terminu „rys" (np. strona 13 rozprawy) lub „rysunek" (np. strona 16 rozprawy).
7. Recenzent spodziewał się wniosków końcowych opracowanych wyłącznie na podstawie badań przeprowadzonych przez Doktorantkę. Zbyteczne jest cytowanie innych prac oraz stosowanie trybu przypuszczającego w rozdziale dotyczącym wniosków.

5. Ocena końcowa przedłożonej rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska charakteryzuje się przede wszystkim ważnym aspektem aplikacyjnym, ale i poznawczym. W pracy Autorka wykazała zasadność stosowania szalunków i zbrojeń z tworzywa sztucznego wytwarzanych techniką przyrostową, zarówno ze względów wytrzymałościowych, środowiskowych (filament z recyklingu) oraz ekonomicznych (wzrost wydajności). Powyższe wpisuje się w globalne dążenia do zapewnienia zrównoważonego wytwarzania dóbr.

Autorka zaprezentowała metodologie badawczą adekwatną do przyjętej w dysertacji ścieżki badawczej. Przedłożone powyżej pytania i uwagi wynikają głównie z dużego zainteresowania recenzenta tematyką rozprawy. Mają one w dużej mierze charakter dyskusyjny, ale wskazują jednocześnie potrzebę rozszerzenia zakresu prac badawczych np. o zastosowanie analiz numerycznych. Recenzent widzi w tych analizach podstawę dla Doktorantki do rozwijania nowych wątków badawczych w kontekście wytwarzania przyrostowego. Umożliwi to niewątpliwie opracowanie modeli numerycznych, które nie tylko odzwierciedlą zachowanie już istniejących modeli fizycznych, ale także pozwolą zidentyfikować parametry, które mają kluczowy wpływ na poprawę funkcjonalności badanych struktur.

Zdefiniowany zakres prac i analiz pozwolił Doktorantce osiągnąć postawie cele dysertacji i potwierdzić założone tezy. Jednocześnie należy zauważyć, iż aktywności badawcze i konferencyjne Autorki, pozwoliły jej na powstanie bardzo licznych i wartościowych publikacji.

6. Wniosek końcowy

Recenzent stwierdza, że przedstawiona dysertacja doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i stawia wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej mgr inż. Anetę Skoratko.

