

Zielona Góra, 18 września 2023r.

dr hab. inż. Jacek Korentz, prof. uczelni
Uniwersytet Zielonogórski
Instytut Budownictwa
65-417 Zielona Góra, ul. Licealna 9
e-mail: j.korentz@ib.uz.zgora.pl

Przyjęciem 27.09.2023

DZIEKAN
Wydziału Inżynierii Lądowej
[Signature]
prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz

WPLYNĘŁO

27.09.2023
524 2023

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Kostiantyna Protchenko
pt. „Fire Behaviour of HFRP Bars in Concrete Bent Elements”

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzja została opracowana na prośbę Pana dr hab. inż. Konrada Lewczuka, prof. uczelni Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej zawartą w piśmie nr WTBD.521.Dr.122.2023 z dnia 13 lipca 2023r. Podstawę formalną recenzji stanowi Uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej z dnia 04 lipca 2023r. o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Kostiantyna Protchenko zatytułowanej „Fire Behaviour of HFRP Bars in Concrete Bent Elements”.

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska, stanowiąca opis zbioru opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych autorstwa i współautorstwa mgr inż. Kostiantyna Protchenko pt. „Fire Behaviour of HFRP Bars in Concrete Bent Elements”. Rozprawę przygotowano na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Elżbiety Szmigiery pełniącej funkcję promotora oraz dr inż. Marka Urbańskiego pełniącego funkcję promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim.

3. Układ i treść rozprawy

Opiniowana rozprawa została wydana w formie książkowej, liczy 88 stron łącznie ze spisem treści, streszczeniem w języku polskim i w języku angielskim, wykazem oznaczeń i symboli oraz bibliografią, listą rysunków i tabel, a także sto kilkadziesiąt stron załączników zawierających listę publikacji stanowiących podstawę merytoryczną rozprawy doktorskiej, wkład poszczególnych autorów w powstanie publikacji, kopie pełnych tekstów 10 artykułów i oświadczenia współautorów.

Rozprawa jest podzielona na sześć rozdziałów.

Rozdział pierwszy zawiera uzasadnienie podjęcia tematu z podkreśleniem wagi czynników determinujących wybór prętów kompozytowych FPR w konstrukcjach z betonu, którymi są przewidywane warunki środowiskowe i założenia projektowe, a w szczególności ich odporność ogniowa, która stanowi obecnie jedno z kluczowych zagadnień badawczych wynikających z potrzeby spełnienia przez te konstrukcje odpowiednich wymagań podczas pożarów, zwłaszcza że brakuje badań dotyczących zachowania się konstrukcji zbrojonych prętami kompozytowymi w warunkach wysokich temperatur. Ponadto rozdział ten zawiera tezy

rozprawy oraz cel i zakres rozprawy, a także jej plan uwzględniający uzyskane wyniki badań opisane w załączonych publikacjach.

Rozdział drugi jest przeglądem aktualnego stanu wiedzy dotyczącego budowy, rodzajów i właściwości fizycznych i mechanicznych prętów kompozytowych FRP, właściwości i roli osnowy i włókien w prętach kompozytowych, wytwarzania prętów kompozytowych w tym sposobem wykańczania ich powierzchni, a przede wszystkim wpływu wysokich temperatur na właściwości prętów FRP i odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych zbrojonych prętami kompozytowymi.

Rozdział trzeci będący opisem badań i wyników z artykułów nr 1,2,3,4,5 i 6 dotyczy charakterystyki prętów hybrydowych HFRP, w których zastosowano kombinację dwóch rodzajów włókien w różnych proporcjach i różnej architekturze: włókno węglowe połączone z włóknom bazaltowym, włókno węglowe połączone z włóknom szklanym, a także prętów, w których żywicę epoksydową modyfikowano dodatkiem nanocząsteczek krzemionki. Zamieszczono w nim podsumowanie wyników badań doświadczalnych dotyczących wytrzymałości tych prętów na ściskanie, rozciąganie i ścinanie, a także ich odkształcalności.

Rozdział czwarty jest opisem badań wstępnych odporności ogniowej betonowych elementów zginanych zbrojonych prętami kompozytowymi. Przedstawiono w nim metodologię przeprowadzonych badań oraz wyniki badań resztkowej odporności ogniowej i standardowej odporności ogniowej, które szczegółowo opisano w artykułach 7 i 8.

Rozdział piąty jest poświęcony głównym badaniom odporności ogniowej betonowych elementów zginanych zbrojonych prętami kompozytowymi. Stanowi podsumowanie wyników badań szczegółowo opisanych w artykułach 9 i 10, w których zastosowano zmodyfikowaną metodologię eksperymentalną w badaniach resztkowej odporności ogniowej i standardowej odporności ogniowej.

Rozdział szósty jest podsumowaniem przeprowadzonych badań i analiz, zawiera wnioski i poczynione obserwacje oraz kierunki dalszych badań dotyczących możliwości stosowania prętów kompozytowych w konstrukcjach z betonu.

Zamieszczona w rozprawie bibliografia zawiera 135 pozycji, w tym 9 pozycji współautorskich Doktoranta.

Struktura rozprawy doktorskiej jest poprawna. Układ, kolejność i zakres poszczególnych części rozprawy są odpowiednie. Omówiono stan zagadnienia z uzasadnieniem podjęcia tematu pracy i na tej podstawie przedstawiono tezy i określono cel i zakres rozprawy. Na podstawie obszernego przeglądu literatury przedmiotu zaprogramowano i wykonano badania doświadczalne o szerokim zakresie hybrydowych prętów kompozytowych i betonowych elementów zginanych zbrojonych tymi prętami w warunkach pożaru. Pozwoliło to na sformułowanie wniosków dotyczących zapewnienia skutecznego stosowania prętów hybrydowych w konstrukcjach z betonu.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska stanowi opis zbioru opublikowanych i powiązanych tematycznie dziesięciu artykułów naukowych, a także dodatkowych powiązanych tematycznie dwunastu artykułów, których autorem i współautorem jest mgr inż. Kostiantyn Protchenko. Dwa z dziesięciu artykułów (nr 9 i 10) są pracami samodzielnymi, a w ośmiu pozostałych współautorskich pracach (nr 1 - 8) udział Doktoranta wynosił odpowiednio 40%, 25%,

10%, 60%, 50%, 50%, 60% i 50%. Artykuły zostały opublikowane w liczących się czasopismach z zakresu Dyscypliny ILGT i materiałach konferencyjnych międzynarodowych konferencji. Były to czasopisma Materials i Archives of Civil Engineering, których aktualna punktacja wg listy MEN wynosi 140 pkt., a ich IF wynosi odpowiednio 3,4 i 0,215. O ile IF tych czasopism nie jest imponujący to należy podkreślić dużą liczbę cytowań tych artykułów. Wg bazy Scopus artykuły te do daty wykonania recenzji były cytowane 54 razy, co świadczy o trafności wyboru problematyki i oryginalności przeprowadzonych badań.

4.1. Ocena doboru tematyki rozprawy

Problematyka rozprawy dotyczy zagadnienia stosowania prętów kompozytowych w konstrukcjach z betonu. Stosowanie prętów kompozytowych jako zbrojenie w elementach betonowych jest dziś mocno ograniczone ze względu na ich właściwości fizyczne i mechaniczne, niewystarczającą ilość badań zachowania się elementów konstrukcyjnych zbrojonych prętami kompozytowymi, a także brak uregulowań normowych dotyczących projektowania konstrukcji betonowych z ich udziałem.

Z tego względu wybór przez mgr inż. Kostiantyna Protchenko tematyki odporności ogniowej elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi jest właściwy, celowy i bardzo potrzebny. Odporność ogniowa tych konstrukcji stanowi obecnie jedno z kluczowych zagadnień badawczych, wynikających z potrzeby zapewnienia, że konstrukcje betonowe zbrojone prętami kompozytowymi zachowają odpowiednie właściwości strukturalne podczas wystąpienia podwyższonych temperatur.

Oceniam podjęty w rozprawie doktorskiej temat jako zasadny do rozważań naukowych, a uzyskane wyniki badań uważam jako użyteczne w praktyce projektowej.

4.2. Ocena celu, tez rozprawy oraz metody rozwiązania postawionego problemu

Na podstawie przeglądu aktualnego stanu wiedzy Doktorant przedstawił tezę rozprawy, która została sformułowana następująco - *zastosowanie prętów hybrydowych HFRP jako wewnętrznego zbrojenia w betonowych elementach wygiętych może poprawić właściwości ognioodporne elementów zginanych zbrojonych prętami kompozytowymi, przewyższając właściwości belek zbrojonych prętami z pojedynczym rodzajem włókna, takim jak pręty bazaltowe BFRP*, a następnie określił zakres i trzy cele naukowe rozprawy: (1) opracowanie najodpowiedniejszej konfiguracji włókien w prętach hybrydowych, (2) ocena skuteczności opracowanych prętów hybrydowych w poprawie zachowania się belek pod wpływem podwyższonych temperatur, (3) oszacowanie wytrzymałości pożarowej belek zbrojonych prętami hybrydowymi.

Realizacja celów badawczych wymagała od Doktoranta przeprowadzenia studiów literaturowych z zakresu budowy i właściwości prętów kompozytowych i ich składników, a także zachowania się elementów zbrojonych prętami kompozytowymi w różnych warunkach środowiskowych i obciążenia. Doktorant dokonał bardzo obszernego przeglądu literatury przedmiotu. Bazował na najnowszych publikacjach z ostatnich lat.

Na podstawie przeglądu literatury Doktorant ustalił, że odporność prętów kompozytowych na działanie podwyższonych temperatur zależy o rodzaju matrycy i rodzaju włókien. Ich temperatura krytyczna, temperatura zeszklenia i temperatura degradacji są bardzo zróżnicowane. Natomiast na podstawie dostępnych wyników badań jedynie można stwierdzić, że wpływ na zachowanie się elementów zbrojonych prętami kompozytowymi w warunkach pożaru ma: rodzaj prętów kompozytowych, grubość otuliny, przyczepność betonu do prętów, a także

rodzaj zastosowanego kruszywa. Elementy zbrojone prętami węglowymi są bardziej skuteczne niż pręty z włókien szklanych.

W pierwszym etapie badań skoncentrowano się na stworzeniu kompozytowych prętów hybrydowych o pożądanych właściwościach mechanicznych, które zależą od udziału poszczególnych rodzajów włókien i ich położenia w przekroju. Uwzględniając właściwości włókien zdecydowano się na kombinacje włókien węglowych z włóknami bazaltowymi i włókien węglowych z włóknami szklanymi. Jako osnowę prętów wykorzystano żywicę epoksydową, którą również modyfikowano dodatkiem nanocząsteczek krzemionki. Skoncentrowano się na określeniu optymalnej kombinacji udziałów objętościowych włókien węglowych i bazaltowych a także na analizie dwóch konfiguracjach lokalizacji włókien węglowych w obszarze rdzenia i w obszarze przypowierzchniowym. Na podstawie analiz numerycznych określono budowę prętów hybrydowych o objętościowym udziale: 16% włókien węglowych, 64% włókien bazaltowych i 20% żywicy epoksydowej. Zdecydowano się na umieszczenie włókien węglowych w rdzeniu przekroju pręta.

Następnym etapem badań była eksperymentalna ocena właściwości mechanicznych zaprojektowanych hybrydowych prętów kompozytowych i porównanie wyników z właściwościami prętów bazaltowych. Zbadano wytrzymałość na rozciąganie i wytrzymałość na ściskanie oraz wytrzymałość na ścinanie dla różnych średnic prętów. Wyniki badań wykazały, że pręty hybrydowe mają wyższy moduł sprężystości i wyższą wytrzymałość na rozciąganie niż pręty bazaltowe, natomiast ich wydłużenie było mniejsze. Pręty hybrydowe wykazały również wyższą wytrzymałość na ścianie i mniejsze odkształcenie niż pręty bazaltowe, a dodatek nanocząsteczek krzemionki do prętów hybrydowych powodował, że ich wytrzymałość na ścinanie była nieco niższa niż prętów kompozytowych bez dodatku nanokrzemionki. Badania wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości przy ścisaniu wykazały, że hybrydyzacja prętów znacznie poprawia wytrzymałość na ściskanie i ich moduł sprężystości. W tych badaniach stwierdzono trzy różne tryby zniszczenia próbek prętów w zależności od ich smukłości.

Kolejnym krokiem były wstępne badania odporności ogniowej elementów zginanych zbrojonych prętami kompozytowymi bazaltowymi i hybrydowymi. Celem tych badań była wstępna ocena zdolności badanych belek do wytrzymywania szeregu scenariuszy pożaru i obciążeń, a w niektórych przypadkach wyłącznie warunków pożarowych. W badaniach belek zastosowano standardową krzywą pożaru, a ponadto oceniano nośność resztkową belek po wystawieniu ich na działanie podwyższonych temperatur. We wszystkich przypadkach badanych belek zaobserwowano oznaki spalania osnowy prętów i jej odparowania w środkowej części prętów. Mimo to część włókien pozostała nienaruszona i nadal przenosiła obciążenia. Ponadto doszło do odspojenia prętów od betonu.

Nośność resztkowa belek zbrojonych prętami kompozytowymi była bardzo podobna i stanowiła około 60% nośności belek referencyjnych. Najmniejszy spadek nośności zanotowano dla belek zbrojonych prętami hybrydowymi bez nanokrzemionki. Zniszczenie belek następowało w wyniku wyczerpania nośności prętów rozciąganych.

W badaniach standardowej odporności ogniowej belki były poddane działaniu temperatury aż do ich zniszczenia i obciążenia stanowiącego 50% obciążenia granicznego. Belki zbrojone prętami bazaltowymi uległy zniszczeniu po 82 i 97 minutach pożaru, a belki zbrojone prętami hybrydowymi po 50 i 82 minutach. Zniszczenie belek zbrojonych prętami bazaltowymi nastąpiło w wyniku zniszczenia prętów w strefie rozciąganej, natomiast belki zbrojone prętami hybrydowymi uległy zniszczeniu w wyniku kruszenia betonu strefy ściskanej, natomiast ugięcia belek z prętami bazaltowymi były znacząco większe od ugięcia belek zbrojonych prętami

kompozytowymi.

Celami badań głównych odporności ogniowej elementów zginanych zbrojonych prętami kompozytowymi była ocena zachowania się belek w podwyższonych temperaturach i po ich działaniu oraz badania wpływu czasu ogrzewania i otuliny na ich odporność ogniową. Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono, że: (1) dwukrotne zwiększenie otuliny nie jest wystarczające aby zapobiec utracie nośności belek z prętami bazaltowymi na skutek zniszczenia zbrojenia, (2) belki narażone na działanie ognia uległy zniszczeniu przez wyczerpaniem nośności zbrojenia w przeciwieństwie do zniszczenia belek referencyjnych w wyniku wyczerpania nośności betonu strefy ściskanej, (3) belki zbrojone prętami bazaltowymi wytrzymały działania podwyższonych temperatur przez ponad 90 minut, a belki zbrojone prętami węglowymi przez 120 minut, (4) w wyniku działania podwyższonych temperatur nośność resztkowa belek zbrojonych prętami hybrydowymi stanowi od 20% do 40% ich nośności pierwotnej, (5) ugięcia belek z prętami hybrydowymi były dwukrotnie mniejsze niż ugięcia belek z prętami bazaltowymi.

Natomiast standardowe badania odporności ogniowej belek pod obciążeniem w warunkach pożaru przez 120 minut wykazały, że: (1) obecność włókien węglowych w prętach hybrydowych może powodować efekt sprężenia w wyniku działania podwyższonych temperatur stąd ich mniejsze ugięcie, (2) belki z prętami bazaltowymi uległy zniszczeniu w ciągu 90 - 100 minut w wyniku łącznego efektu odparowania matrycy, degradacji włókien i degradacji przyczepności betonu do prętów, (3) dwie z trzech belek ze zbrojeniem hybrydowym wytrzymały cały okres działania podwyższonej temperatury i obciążenia, (4) zwiększenie otuliny ma pozytywny wpływ na wytrzymałość pożarową belek zbrojonych prętami hybrydowymi wydłużając czas do chwili degradacji ich nośności.

Wnioski i uwagi końcowe w rozprawie są podsumowaniem przeprowadzonych badań. Doktorant stwierdza, że trzy cele naukowe rozprawy zostały osiągnięte, a uzyskane wyniki badań potwierdziły postawioną tezę w rozprawie. Jako kierunki dalszych badań Doktorant wskazał: badania przyczepności betonu do prętów kompozytowych w warunkach wysokich temperaturach, modyfikację osnowy prętów różnymi dodatkami, optymalizację kosztów wytwarzania prętów kompozytowych, rozszerzenie badań odporności pożarowej na inne elementy konstrukcyjne.

Mgr inż. Kostiantyn Protchenko przedstawił ciekawe rozwiązanie problemu naukowego wykazując się umiejętnością samodzielnej pracy naukowej. Na podstawie obszernego przeglądu stanu wiedzy określił tezę dysertacji i wyznaczył jej cele naukowe o charakterze aplikacyjnym. Wyznaczył bardzo obszerny program badań doświadczalnych, których zakres pozwolił na udowodnienie postawionej tezy i realizację wyznaczonych celów rozprawy.

Podsumowując ocenę merytoryczną rozprawy, do istotnych osiągnięć naukowych Doktoranta zaliczam: (1) trafnie dobrany temat rozprawy doktorskiej, (2) zaprogramowanie i zrealizowanie kompleksowego i szerokiego program badań, (3) wykorzystanie nowoczesnych technik i metod badawczych, (4) wielopłaszczyznową, wszechstronną i wnikliwą analizę wyników badań pozwalająca na właściwe wnioskowanie, (5) oryginalne wyniki badań, (6) aplikacyjny charakter wyników badań.

Ponadto uznaję, że udział i wkład merytoryczny Doktoranta w powstanie cyklu publikacji stanowiących podstawę recenzowanej rozprawy doktorskiej jest w zupełności wystarczający. Na podstawie załączonych oświadczeń współautorów można ustalić, że Jego średni udział w powstanie tych publikacji stanowi ponad 50%.

5. Uwagi krytyczne

Rozprawa zawiera pewne usterki, do których zaliczam:

1. Tytuł rozprawy „*Fire Behaviour of HFRP Bars in Concrete Bent Elements*” nie oddaje przedmiotu i zakresu rozprawy. Rozprawa dotyczy raczej badania odporności pożarowej belek z betonu zbrojonych prętami hybrydowymi. Dlatego moim zdaniem tytuł „*Fire behavior of concrete bent elements reinforced with HFRP bars*” byłby bardziej odpowiedni.
2. W trakcie lektury dysertacji opis wyników badań zmusza czytelnika do zbyt częstego zaglądania do załączonych tekstów artykułów. Ponadto liczne odwołania w tekście do tabel 4.1 i 5.1 utrudniają lekturę rozprawy. Zbiorcze wykresy np. słupkowe z uzyskanymi wynikami badań z przekrojami belek lub opisem zbrojenia belek byłyby lepszym rozwiązaniem.
3. Str.43. W tabeli 2.6. jest informacja o wytrzymałości na ściskanie stali wynoszącej 180 - 250 MPa i o wytrzymałości stali na rozciąganie wynoszącej 483 - 690 MPa. Skąd ta różnica? Jakie jest źródło informacji o wytrzymałości stali na ściskanie?
4. Str.61. Podane są błędne odwołania do pozycji bibliografii [140] i [125]. W bibliografii nie ma pozycji [140], a zamiast [125] powinno być [126].

Wymienione uwagi krytyczne mają charakter technicznych uwag, które w niczym nie umniejszają wartości merytorycznej rozprawy, a mogą być przydatne dla Autora w dalszej działalności publikacyjnej.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy istotnych i bardzo aktualnych dla budownictwa zagadnień związanych z odpornością pożarową konstrukcji z betonu zbrojonych prętami niemetalicznymi. Oprócz wartości poznawczych dysertacja ma duże znaczenie dla praktyki. Praca zawiera bardzo interesujące badania i analizy. Oryginalny problem naukowy przedstawiony w rozprawie został rozpoznany, właściwie zdefiniowany i rozwiązany.

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą w dyscyplinie naukowej i umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Przedłożona do recenzji dysertacja doktorska mgr inż. Kostiantyna Protchenko pt. „*Fire Behaviour of HFRP Bars in Concrete Bent Elements*”, opracowana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Elżbiety Szmigiery pełniącej funkcję promotora i dr inż. Marka Urbańskiego pełniącego funkcję promotora pomocniczego, spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym z dnia 20 lipca 2018 r. (tekst jednolity DzU z 2022 r., poz.574 z późniejszymi zmianami).

W związku z powyższym stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Kostiantyna Protchenko do publicznej obrony recenzowanej rozprawy doktorskiej

