

Bydgoszcz, 23 sierpnia 2023

**Recenzent:**

Dr hab. inż. Maciej Dutkiewicz, prof. PBŚ  
Politechnika Bydgoska im. J.J. Śniadeckich  
Katedra Konstrukcji Budowlanych i Mechaniki,  
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska,  
Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz  
Tel. +48 510 035 090  
e-mail: maciej.dutkiewicz@pbs.edu.pl

**Adresat Recenzji:**

Rada Naukowa Dyscypliny Inżynieria Lądowa,  
Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej  
Politechnika Warszawska  
Ul. Koszykowa 75  
00-662 Warszawa

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**mgr inż. Małgorzaty Wydry**

**pt. „Fire resistance of concrete columns reinforced with bfrp bars”**

**(Odporność ogniowa słupów betonowych zbrojonych prętami BFRP)**

**1. Podstawa opracowania**

Recenzja została opracowana na prośbę Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, Pana dr hab. inż. Konrada Lewczuka, profesora uczelni wyrażoną w piśmie z dnia 22.06.2023 r., którego załącznikiem jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i

Transport Politechniki Warszawskiej z dnia 06.06.2023 r., powołującą mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Małgorzaty Wydry.

## **2. Przedmiot i opis ogólny rozprawy**

Przedmiot recenzji stanowi rozprawa doktorska mgr inż. Małgorzaty Wydry pt. „Fire resistance of concrete columns reinforced with bfrp bars” (Odporność ogniowa słupów betonowych zbrojonych prętami BFRP), a jej promotorem jest dr hab. inż. Jadwiga Fangrat, prof. ITB, promotorem pomocniczym jest dr inż. Wojciech Kubissa. Przesłana do oceny praca doktorska liczy wraz z załącznikami 293 strony. Praca ma 7 rozdziałów, spis literatury, tabel, rysunków oraz załączniki. Praca napisana została w języku angielskim, zawiera streszczenia w językach: polskim i angielskim. Układ pracy jest czytelny i sposób jej wydania poprawny.

## **3. Tematyka rozprawy**

### **3.1. Przedmiot, cel, pytania badawcze i zakres pracy**

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego polegającego na określeniu wpływu prętów zbrojeniowych wykonanych z włókien bazaltowych (BFRP) na odporność ogniową słupa betonowego zbrojonego tego typu prętami oraz porównanie z tradycyjnym zbrojeniem prętami stalowymi przez wykonanie badań doświadczalnych i symulacji numerycznych.

Główne cele badawcze rozprawy były następujące:

1. Numeryczne oszacowanie rozkładu temperatury i odporności ogniowej słupów z wewnętrznym zbrojeniem głównym BFRP.
2. Eksperymentalne określenie odporności ogniowej dla osiowo ściskanego pełnowymiarowego słupa ze zbrojeniem głównym BFRP.

Aby osiągnąć wyżej wymienione cele, sformułowano następujące cele dodatkowe:

1. Eksperymentalne określenie właściwości mechanicznych i cieplnych prętów BFRP.
2. Porównanie wyników doświadczalnych i numerycznych prób ściskania słupów o zmniejszonej skali ze zbrojeniem FRP w temperaturze pokojowej.
3. Walidacja modelu numerycznego odporności ogniowej z wykorzystaniem danych dostępnych w literaturze dotyczącej słupów ze zbrojeniem stalowym oraz elementów zginanych ze zbrojeniem FRP.

4. Określenie kluczowych czynników potencjalnie wpływających na odporność ogniową słupów ze zbrojeniem FRP poprzez parametryczne badanie numeryczne.

Problem rozwiązywany w pracy analizowany był w zakresie następujących pytań badawczych:

1. Czy osiowo ściskany słup betonowy ze zbrojeniem BFRP może uzyskać odporność ogniową na poziomie umożliwiającym właściwe zaprojektowanie i zastosowanie tego typu zbrojenia prętami kompozytowymi jako alternatywy dla tradycyjnego zbrojenia prętami stalowymi?
2. Czy możliwe jest określenie powyżej wskazanej odporności ogniowej z wykorzystaniem dostępnych metod numerycznych na satysfakcjonującym poziomie zgodności z wynikami badań doświadczalnych?
3. Jakie czynniki mogą wpływać na odporność ogniową słupów betonowych ze zbrojeniem BFRP?

W pracy Autorka rozwiązywała następujący zakres:

- badania doświadczalne właściwości fizycznych i cieplnych prętów BFRP (średnica, gęstość, temperatura zeszklenia, przewodność cieplna i ciepło właściwe);
- badania doświadczalne na prętach BFRP przy rozciąganiu w temperaturze pokojowej;
- badania doświadczalne na prętach BFRP przy ściskaniu w temperaturze pokojowej;
- badania doświadczalne dwiema metodami prętów BFRP przy ściskaniu podczas ogrzewania do 50 °C, 100 °C, 200°C;
- badania doświadczalne na prętach  $\varnothing$  8 BFRP w osadzeniu betonu przy ściskaniu po podwyższonej temperaturze (20°C, 100°C, 200°C, 285°C - w każdym przypadku: 3 próbki z prętami i 3 próbki wykonane z czystego betonu);
- badania właściwości betonu;
- analizy numeryczne słupów betonowych osiowo ściskanych ze wzmocnieniem wewnętrznym FRP w temperaturze pokojowej w zmniejszonej skali dla prętów kompozytowych z włóknami bazaltowymi, szklanymi i referencyjnie dla zbrojenia stalowego;

- badania doświadczalne i analizy numeryczne na mimośrodowo ściskanych słupach o zredukowanej skali ze wzmocnieniem BFRP w temperaturze pokojowej dla mimośrodu równego: 0 cm, 2 cm i 6 cm;
- analizy numeryczne 4 słupów ze stalowym zbrojeniem wewnętrznym poddanych badaniu odporności ogniowej w porównaniu do danych dostępnych w literaturze;
- parametryczne analizy numeryczne uwzględniające 24 pełnowymiarowe słupy betonowe w badaniu odporności ogniowej;
- badania doświadczalne i analizy numeryczne na pełnowymiarowym słupie w badaniu odporności ogniowej.

### 3.2. Charakterystyka i ocena poszczególnych rozdziałów rozprawy

Praca składa się z siedmiu rozdziałów. W pierwszym rozdziale podano informacje wprowadzające w analizowaną tematykę. W drugim rozdziale opisano i podsumowano dane literaturowe. W pierwszej kolejności przedstawiono właściwości materiałowe włókien bazaltowych jak i kompozytów z różnymi włóknami w zakresie podwyższonych i wysokich temperatur. Analizowano zagadnienia dotyczące FRP do wzmocniania betonu, po czym omówiono zachowanie się elementów konstrukcyjnych, w podziale na elementy ściskane ze zbrojeniem wewnętrznym FRP oraz elementy betonowe z FRP w podwyższonym i wysokim zakresie temperatury (w tym badania odporności ogniowej). Na końcu tego rozdziału podane są wnioski z badań literaturowych. Opis problemu naukowego został zawarty w trzecim rozdziale. Przedstawiono w nim cele główne i cele wspomagające. W rozdziale czwartym opisano próbki, metody i wyniki przeprowadzonych eksperymentów. Część doświadczalna podzielona jest na: analizy uwzględniające badania termomechaniczne materiałów, w szczególności prętów BFRP oraz doświadczenia w pełnej skali lub skali 1/2 na słupach ze zbrojeniem BFRP w temperaturze pokojowej i w badaniach odporności ogniowej. W rozdziale piątym przedstawiono obliczenia numeryczne. Autorka podała założenia numerycznego modelowania właściwości cieplnych i mechanicznych materiałów dla betonu, stali i BFRP. W tej części pracy przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych: począwszy od osiowo i mimośrodowo ściskanych słupów ze zbrojeniem wewnętrznym BFRP testowanych w temperaturze pokojowej, poprzez wstępną walidację modelu z wykorzystaniem dostępnych w literaturze danych doświadczalnych dotyczących słupów z tradycyjnym zbrojeniem stalowym w badaniu odporności ogniowej kończąc na analizie

numerycznej słupów ze zbrojeniem wewnętrznym BFRP w badaniu odporności ogniowej. Ostatnia część tych rozważań uwzględnia: porównanie z własnymi pełnowymiarowymi danymi doświadczalnymi, numeryczne badanie parametryczne analizujące różne parametry wpływające na odporność ogniową oraz porównanie zachowania się słupów ze zbrojeniem ze stali i słupów wzmocnionych BFRP. **Rozdział szósty** zawiera omówienie wyników części eksperymentalnej i numerycznej badań, natomiast w **rozdziale siódmym** przedstawiono podsumowanie i wnioski wraz z przyszłymi kierunkami badań. Na podstawie wykonanych badań i analiz Doktorantka sformułowała wnioski szczegółowe i ogólne.

#### 4. Merytoryczna ocena pracy i uwagi krytyczne

Tematyka podjęta w pracy ma istotne znaczenie naukowe i praktyczne.

Program badań obejmował badania doświadczalne wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie prętów BFRP w temperaturze pokojowej. Określono wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie, a także moduł sprężystości przy rozciąganiu i ścisaniu. Przeprowadzono również badania wytrzymałości na ściskanie podczas ogrzewania, zastosowano dwie metody, oraz po nagrzewaniu w otulinie betonowej. Zaobserwowano szybką redukcję wytrzymałości na ściskanie ze wzrostem temperatury - o 93% i 91% w temperaturze 100°C oraz o 81% i 75% w temperaturze 200°C, odpowiednio dla metody A i B. Kolejnym etapem były badania temperatury szklenia i ciepła właściwego. Analiza wyników przeprowadzonych doświadczeń pozwoliła na określenie wartości temperatury krytycznej dla prętów przy ścisaniu (100°C), która jest zgodna z typową wartością temperatury zeszklenia prętów FRP z żywicą epoksydową, ale znacznie niższa niż wartość sugerowana w literaturze dla prętów BFRP poddanych rozciąganiu (np. 400°C). Jest to również znacznie mniej niż wartości temperatury krytycznej sugerowane dla typowych, stalowych prętów zbrojeniowych – np. 500°C według uproszczonej metody wyznaczania odporności ogniowej według PN-EN 1992-1-2:2004. Następnie przeprowadzono badania i analizy numeryczne słupów w skali zredukowanej (próbki 150 mm ´ 150 mm ´ 750 mm i 150 mm ´ 150 mm ´ 1500 mm – bok ´ bok ´ wysokość) ze zbrojeniem prętami BFRP poddanymi ścisaniu osiowemu i mimośrodowemu w temperaturze pokojowej.

Kolejne badania dotyczyły odporności ogniowej słupa w pełnej skali z wewnętrznym zbrojeniem w postaci prętów BFRP (3700 mm wysokość oraz 300 mm średnica). Również przeprowadzono symulacje numeryczne dla tego elementu, po wstępnej

walidacji modelu na danych doświadczalnych dotyczących słupów zbrojonych stalą, dostępnych w literaturze.

Dodatkowo przeprowadzono analizy parametryczne w celu określenia kluczowych czynników wpływających na odporność ogniową ściskanych elementów zbrojonych prętami BFRP.

Na podstawie przeprowadzonych analiz sformułowano następujące wnioski ogólne:

1. Potwierdzono w ramach niniejszej pracy, że osiowo ściskane słupy betonowe ze zbrojeniem BFRP mogą wykazać odporność ogniową na poziomie umożliwiającym właściwe zaprojektowanie i zastosowanie tego typu elementów konstrukcyjnych. Jednakże, ma to zastosowanie wyłącznie do niskiego poziomu obciążenia (do 30%) i osiowego obciążenia. Stosując tego typu zbrojenie prętami kompozytowymi jako alternatywę dla tradycyjnego zbrojenia prętami stalowym podczas projektowania konstrukcji betonowych należy pamiętać o licznych różnicach pomiędzy nimi. Najważniejszymi są: niski moduł sprężystości, palność, intensywna redukcja właściwości mechanicznych w podwyższonych temperaturach, brak ciągliwości (brak wyraźnych oznak uszkodzenia przed zniszczeniem) oraz ich różne zachowanie podczas ściskania i rozciągania.

2. Należy zwrócić uwagę nie tylko na właściwości mechaniczne prętów, lecz również na prawdopodobieństwo powstania dodatkowego źródła ciepła na skutek zapłonu prętów BFRP, jak również emisji toksycznych gazów na skutek spalania żywicy w prętach BFRP.

3. Elementy ściskane zbrojone stalą i/lub BFRP uległy zniszczeniu w sposób gwałtowny, na długo przed osiągnięciem granicznej wartości skrócenia ( $C_{limit}$ ) – PN-EN-1363-1:2020. W związku z tym, definicja końca badania odporności ogniowej poprzez osiągnięcie tych wartości nie daje odzwierciedlenia co do zachowania elementu w rzeczywistym badaniu odporności ogniowej. Należałoby rozważyć utratę zdolności słupa do przenoszenia obciążeń mechanicznych po określonym czasie nagrzewania raczej niż jego odkształcenia.

4. Uzyskano zadowalający poziom zgodności pomiędzy wynikami symulacji numerycznych i eksperymentu. Odporność ogniowa w symulacjach numerycznych była mniejsza o 25% ÷ 34% od wyniku z eksperymentu, gdy nie brano pod uwagę dodatkowej korekty, i o 17% ÷ 27%, gdy zastosowano dodatkową korektę wyniku eksperymentalnego jako analogię do metody zaprezentowanej w PN-EN 13381-4:013. Odporność ogniowa określona eksperymentalnie była wyższa niż wynikająca z symulacji numerycznej przy

przyjętych założeniach. Taka sytuacja potwierdza wystąpienie zapasu bezpieczeństwa w powyższych obliczeniach.

5. Zgodnie z przeprowadzoną analizą numeryczną najważniejszymi czynnikami spośród przeanalizowanych wpływającymi na odporność ogniową słupów ze zbrojeniem BFRP okazały się wyłączenie elementu i mimośrodowość obciążenia. Znaczący wpływ miały również: wytrzymałość na ściskanie betonu, grubość otuliny betonowej i rozstaw strzemion. Są to podobne czynniki, co w przypadku elementu betonowego z tradycyjnym zbrojeniem stalowym.

Uniwersalność i kompleksowość prowadzonych przez Doktorantkę badań dotyczy określenia wpływu prętów zbrojeniowych wykonanych z włókien bazaltowych (BFRP) na odporność ogniową słupa betonowego zbrojonego tego typu prętami oraz porównanie z tradycyjnym zbrojeniem prętami stalowymi przez wykonanie badań doświadczalnych i symulacji numerycznych. Rozprawa ma charakter aplikacyjny i może być wykorzystana w praktycznych rozwiązaniach elementów konstrukcyjnych z betonu zbrojonych zbrojeniem niemetalicznym

Wykonana praca teoretyczna i eksperymentalna świadczy o dojrzałości naukowej Doktorantki. Konsekwencja w pracy eksperymentalnej, która wymagała wielu testów i kolejnych iteracji, doprowadziła do unikatowych osiągnięć w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport. Doktorantka wykazała się bardzo dobrym przygotowaniem do samodzielnego rozwiązywania zadań badawczych, umiejętnością zastosowania adekwatnych metod badawczych, a także umiejętnością analizy wyników oraz poprawnego wnioskowania. Ponadto na uwagę zasługują: przeprowadzona analiza numeryczna potwierdzająca uzyskane rezultaty laboratoryjne, bardzo szczegółowy merytoryczny przegląd literatury, przeprowadzony w sposób systematyczny i jednocześnie syntetyczny. Należy podkreślić znaczącą liczbę publikacji Autorki:

- w czasopismach – 5,
- w materiałach konferencyjnych – 5,
- prezentacje na konferencjach naukowych – 5,
- artykuły w czasopismach w trakcie recenzji – 5.

Praca doktorska jest napisana zrozumiale, poprawnie pod względem edytorskim i językowym. Do wymagających wyjaśnienia i dyskusji należą kwestie przedstawione poniżej.

- 1) Strona 8, powtórzono słowo „jest”: „*Czy jest możliwe jest określenie powyżej wskazanej odporności ogniowej z wykorzystaniem dostępnych metod numerycznych na satysfakcjonującym poziomie zgodności z wynikami badań doświadczalnych?*”,
- 2) Strona 231, jest „Chryso Omega 448”, powinno być „Chryso Omega 448”,
- 3) Strona 52, badając pręty BFRP zastosowano stalowe kotwy wypełnione zaprawą ekspansywną lub żywicą epoksydową. W jakich przypadkach stosowano zaprawę, a w jakich żywicę? Jaką zaprawę zastosowano i jaką żywicę?
- 4) Strona 74, rys. 39, opisy na rysunku są w języku polskim,
- 5) Strona 74, wymiary słupów 150x150x1500mm, 150x150x750mm, strona 76, wymiary słupa fi 300x3700 mm. Czym spowodowane było przyjęcie różnych wymiarów słupów, w szczególności o przekroju kwadratowym i okrągłym?
- 6) Jaki jest wpływ stopnia zbrojenia słupów?
- 7) Jaki jest wpływ warunków podparcia na sposób zniszczenia słupów w eksperymencie laboratoryjnym? Jaki był sposób zniszczenia słupów – w którym przekroju następowało zniszczenie i jakimi efektami było spowodowane?
- 8) Interesujące byłoby szersze wyjaśnienie przyjętego mimośrodów 2cm, 4cm, strona 99, rys.57, strona 104, tab.26.
- 9) Interesujące byłoby bardziej szczegółowa analiza zbieżności wyników uzyskanych numerycznie.

## 5. Wnioski

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Małgorzaty Wydry pt. „Fire resistance of concrete columns reinforced with bfrp bars” (Odporność ogniowa słupów betonowych zbrojonych prętami BFRP) stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i potwierdza wiedzę Autorki w zakresie dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport, w szczególności w zakresie analizy elementów z betonu znajdujących się w szczególnych warunkach eksploatacji. Autorka pracy osiągnęła postawione cele. Doktorantka posiada wysokie umiejętności w prowadzeniu badań oraz analizie ich wyników. Ogólny zakres tematyki pracy jest bardzo szeroki, zarówno w obszarach materiałowych, warunkach podparcia, typach obciążenia elementów, współpracy elementów słupowych w układach złożonych: np. słup-rygiel-ściana-strop. Dla zwiększenia aplikacyjności uzyskanych efektów pracy, wskazane są dalsze badania w poruszanych w pracy obszarach.



## 6.Sentencja recenzji

Recenzowana rozprawa Pani mgr inż. Małgorzaty Wydry pt. „Fire resistance of concrete columns reinforced with BFRP bars” (Odporność ogniowa słupów betonowych zbrojonych prętami BFRP) spełnia wymogi stawiane w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (późniejszymi zmianami) oraz w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z 19 stycznia 2018 r., a jej wyniki mają istotne znaczenie naukowe oraz praktyczne. Wnoszę o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony i wyróżnienie pracy.

Z poważaniem,



Dr hab.inż. Maciej Dutkiewicz, prof. PBŚ