

<b>Autor:</b>	<b>Małgorzata Wydra</b>
<b>Tytuł:</b>	<b>Odporność ogniowa słupów betonowych zbrojonych prętami BFRP</b>
<b>Stron</b>	295
<b>Rysunków</b>	204
<b>Tabel</b>	104
<b>Pozycji bibliograficznych</b>	238
<b>Dodatków</b>	0
<b>Załączników</b>	17

**Słowa kluczowe:** pręty zbrojeniowe z kompozytu bazaltowego, słup, odporność ogniowa

Kompozytowe pręty zbrojeniowe FRP są uważane za dobrą alternatywę dla zbrojenia stalowego, głównie ze względu na ich wysoką wytrzymałość na rozciąganie i odporność na korozję. Niemniej jednak ich właściwości mechaniczne ulegają redukcji nawet w nieznacznie podwyższonych temperaturach. Obecnie coraz częściej stosowane pręty kompozytowe z włóknami bazaltowymi (BFRP) mają właściwości mechaniczne porównywalne z innymi typami prętów kompozytowych (FRP), ale wykazują się dużo mniejszym wpływem na środowisko podczas produkcji. Ponadto włókna bazaltowe, ze względu na wysoką temperaturę topnienia, powinny być odpowiednie do zastosowań w warunkach w podwyższonej temperatury, w tym warunkach pożarowych.

Przeprowadzone parametryczne analizy numeryczne mogą w znaczącym stopniu uzupełnić stan wiedzy w zakresie zachowania elementów betonowych ze zbrojeniem FRP w warunkach pożarowych. Ponadto, wyniki eksperymentalne stosunkowo nowego typu bazaltowych prętów FRP również uzupełniają istniejącą lukę w wiedzy, szczególnie w zakresie określania modułu sprężystości przy ścisaniu i zmniejszenia ich wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem temperatury. Ponadto, zaproponowano wykorzystanie modelu CDP w celu przewidywania odporności ogniowej słupów ze zbrojeniem BFRP i zbrojeniem stalowym (w odniesieniu do własnych danych doświadczalnych i wyników dostępnych w literaturze).

Problem badawczy niniejszej rozprawy był analizowany przy zastosowaniu 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 jest 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?

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 uszkadzania 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 wyczerpanie 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.

<b>Author:</b>	<b>Malgorzata Wydra</b>
<b>Title:</b>	<b>Fire resistance of concrete columns reinforced with BFRP bars</b>
<b>Pages</b>	295
<b>Figures</b>	204
<b>Tables</b>	104
<b>References</b>	238
<b>Supplements</b>	0
<b>Appendixes</b>	17

**Keywords:** Basalt Fibre Reinforced Polymer bars, column, fire resistance

Fibre Reinforced Polymer reinforcement bars are considered a good alternative to steel reinforcement mainly due to their high tensile strength and corrosive resistance. Nevertheless, their mechanical performance at even slightly elevated temperatures degrades significantly. Relatively newly developed basalt FRPs have mechanical performance comparable to other types of FRPs but have lower environmental influence during production. Also, the basalt fibres, due to their high melting temperature, are supposed to be suitable for high temperature performance.

Carried out parametric numerical study can give significant insight into the performance of such elements, as there is very little data available in the literature considering compressed elements with FRP internal reinforcement under fire conditions. Also, experimental results of BFRP bars fulfil the existing knowledge gap, especially in terms of determining the elasticity modulus at compression and reduction of compressive strength with the temperature growth as far as their behaviour. Moreover, the use of Concrete Damaged Plasticity model was applied to predict fire resistance of concrete columns with BFRP reinforcement and with steel reinforcement (with reference to own experimental data and results available in the literature).

The scientific problem analysed within this thesis has been identified in the form of the following questions:

1. Is the axially compressed concrete column with BFRP reinforcement capable of achieving fire resistance at the level enabling proper design and application of such bars as an appropriate alternative to traditional, steel reinforcement?
2. Is it possible to predict such fire resistance by means of numerical methods with a satisfactory level of compliance with experimental results?
3. What factors may influence on the fire resistance of concrete column with BFRP reinforcement bars?

The first stage of the investigations was the experimental tests of BFRP bars' tensile and compressive performance at room temperature. The tensile and compressive strengths were determined, as well as the tensile and compressive modulus of elasticity values. Additionally, compressive strength tests were performed during heating (two methods applied) and after heating in the concrete embedment. Rapid degradation of compressive strength was noted for even slightly elevated temperatures – reduction by 93% and 91% at 100°C, and 81% and 75% at 200°C, respectively, depending on the method. Also, glass transition temperature and specific heat tests were carried out. Analysis of the results from the performed experiments enabled the definition of critical temperature value for the bars in compression (100°C), which is in line with the glass transition temperature value for the typical FRP bars with epoxy resin, but much lower than the value suggested in the literature for BFRP bars in tension (e.g. 400°). This is also much lower than the values of critical temperatures suggested for typical, steel reinforcement bars - e.g. 500°C as per the simplified method of fire resistance determining according to PN-EN 1992-1-2:2004.

Then, the experimental investigations of half-scale columns (150 mm × 150 mm × 750 mm, and 150 mm × 150 mm × 1500 mm specimens - side × side × height) reinforced with BFRP bars submitted to axial and eccentric compression at room temperature were performed. Simultaneously, numerical considerations of these specimens were also carried out using the same method as in previous analyses performed by the author of this thesis.

Next, an experimental investigation of the fire resistance was carried out on the full-scale concrete column (3700 mm in height and 300 mm in diameter) with BFRP internal main reinforcement. Also, numerical simulation was performed for this specimen, after preliminary validation of the model on steel reinforced elements' experimental data available in the literature. Additionally, a parametric study was performed to determine key factors influencing the fire resistance of BFRP bars' reinforced compressed elements.

The following general conclusions were drawn from this study:

1. The compressed concrete column with BFRP reinforcement appeared to be capable of achieving fire resistance at the level enabling proper design and application of such structures. However, this applies only to the low level ratio (up to 30%) and axial load. Though, when using such a reinforcement as an alternative to traditional, steel reinforcement during the concrete structures' design, significant differences should be addressed. Amongst them, the most important are: lower elasticity modulus, flammability, more intense reduction of mechanical properties at elevated temperatures, no yielding (no apparent signs of deterioration prior to failure), and their different performance in compression in reference to tension.
2. Not only mechanical response should be considered, but also the possibility of formation of an internal heat source due to heating and the possible ignition of BFRP bars as well as emission of toxic gases due to thermal decomposition processes of resin in BFRP rebars.
3. The compressed elements reinforced with steel and/or BFRP reinforcement – failed in both - experimental investigations and numerical analyses – in a rupture mode, far before achieving contraction limit standard value ( $C_{limit}$ ) – PN-EN-1363-1:2020. Therefore, the definition of the end of the test by values given in this standard has no reflection in the behaviour of such elements at the fire resistance test. Loss of capability to transfer mechanical loads after a set period of heating should be considered rather than deformations of the element.
4. A good level of compliance was achieved, as the numerical model underpredicted the fire resistance of such a column by 25% ÷ 34% when compared to experimental results without adjustment, and 17% ÷ 27% with included adjustment of experimental results proposed by the author as an analogy to the method presented in PN-EN 13381-4:013. The fire resistance defined experimentally was higher than resulting from numerical modelling with the taken assumptions. Such a situation confirms that the safety reserve was preserved in that case.
5. According to performed numerical considerations, the parameters, which might strongly influence the fire resistance of concrete column reinforced with BFRP bars are load ratio and eccentricity. Moreover, the considerable influence have also compressive strength of concrete, thickness of concrete cover and stirrup spacing. These are similar factors like in the case of traditional steel reinforcement.