dr inż. Małgorzata Wydra^{1)*)} ORCID: 0000-0002-4629-9656 dr inż. Grzegorz Sadowski²⁾ ORCID: 0000-0001-6441-0875 dr inż. Piotr Dolny²⁾ ORCID: 0000-0002-5384-9257 dr inż. Piotr Turkowski³⁾ ORCID: 0000-0002-0020-0091 dr hab. inż. Jadwiga Fangrat, prof. ITB³⁾ ORCID: 0000-0002-7871-0032

The performance of concrete cover as a thermal insulation for BFRP bars in tension at early stage of fire Zastosowanie otuliny betonowej jako izolacji termicznej prętów BFRP podczas rozciągania we wczesnej fazie pożaru

DOI: 10.15199/33.2025.05.02

Abstract. Despite multiple beneficial mechanical properties and low ecological impact, limited recognition of the properties of relatively new Basalt Fibre Reinforced Polymer (BFRP) reinforcement bars, especially at elevated and high temperature range, still limits the area of their potential applications in building structures. In this study the performance of such bars in tension during heating up to 200°C in steady state regime, and the performance of concrete cover were investigated. Due to limited data available in terms of elasticity modulus values changes for FRP at elevated temperatures, the Digital Image Correlation (DIC) was used for strain analysis in this study. There was no clearly positive influence of concrete cover on the maximum value of observed stresses. This may be attributed to the loss of bond between concrete and BFRP bars, as well as negligible values of registered strains at the concrete surface were registered.

Keywords: Basalt Fibre Reinforced Polymer; bars; temperature; fire.

espite multiple beneficial mechanical properties and low ecological impact, limited recognition of the properties of relatively new type of composite bars, which is Basalt Fibre Reinforced Polymer (BFRP) bars, especially at elevated and high temperature range, still limits the area of their potential applications $[1 \div 3]$. Main aspect that is typically considered for such conditions is tensile strength reduction, occurring for much lower temperature values than in the case of steel reinforcement. The first intense reduction of strength can be noted around glass transition temperature (T_{a}) , which value depends on type of used polymer, e.g. approx. 100°C for most common types of matrices. Additionally, the necessity of accounting for the bond reduction between FRP and concrete, which can cause premature failure of the element, is underlined.

3) Building Research Institute

Streszczenie. Pomimo wielu korzystnych właściwości mechanicznych i niewielkiego wpływu na środowisko, niedostateczne rozpoznanie właściwości stosunkowo nowych prętów zbrojeniowych z polimeru wzmocnionego włóknem bazaltowym (ang. Basalt Fibre Reinforced Polymer - BFRP), szczególnie w podwyższonej i wysokiej temperaturze, nadal ogranicza obszar ich potencjalnego zastosowania w konstrukcjach budowlanych. W pracy prezentowanej w artykule zbadano charakterystykę takich prętów przy rozciąganiu podczas nagrzewania do 200°C w stanie ustalonym oraz skuteczność ich otuliny betonowej. Ze względu na ograniczoną liczbę dostępnych danych dotyczących zmian wartości modułu sprężystości BFRP w podwyższonej temperaturze, do analizy odkształceń w tym badaniu wykorzystano cyfrową korelację obrazu (ang. Digital Image Correlation - DIC). Nie zaobserwowano pozytywnego wpływu otuliny na maksymalną wartość naprężeń, co można przypisać utracie wiązania między otuliną a prętami BFRP. Ponadto zarejestrowano znikome wartości odkształceń na powierzchni betonu.

Słowa kluczowe: polimer wzmocniony włóknem bazaltowym; pręty zbrojeniowe; temperatura; pożar.

achowanie prętów kompozytowych, jakimi są pręty z polimeru wzmocnionego włóknem bazaltowym (BFRP) w podwyższonej i wysokiej temperaturze jest podkreślane jako jedno z największych wyzwań w przypadku tego typu zbrojenia w dotychczas przeprowadzonych badaniach naukowych [1 ÷ 3]. W takich warunkach uwzględnia się zwykle redukcję wytrzymałości na rozciąganie, występującą przy znacznie niższej temperaturze niż w przypadku zbrojenia stalowego. Pierwsze intensywne obniżenie wytrzymałości można zauważyć w okolicach temperatury szklenia (T_), której wartość zależy od rodzaju zastosowanego polimeru, np. ok. 100°C w przypadku większości popularnych typów matryc. Dodatkowo, podkreślana jest konieczność uwzględnienia redukcji przyczepności między FRP a betonem, która może spowodować przedwczesne uszkodzenie elementu.

Istnieje kilka krajowych norm i wytycznych [4 ÷ 10], dotyczących bezpiecznego wymiarowania elementów z wewnętrznym zbrojeniem FRP, z których jednym jest załącznik J do niedawno opublikowanego Eurokodu 2 [11]. Kwestie

10

¹⁾ University of Michigan, Ann Arbor, United States of America

²⁾ Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Mechanics and Petrochemistry

^{*)} Correspondence address: malgorzata.wydra@pw.edu.pl

Several national normatives and guides have already been published $[4 \div 10]$ considering the safe design of concrete elements with internal FRP reinforcement, one of which is appendix J to recently published Eurocode 2 [11]. However, issues related to the fire resistance of such structural elements, remains one of the biggest challenges to overcome and in most cases are not addressed in those documents. In this study the performance of such bars in tension during heating up to 200°C in steady state regime was investigated, as well as the performance of concrete cover as the thermal insulation. A total of 12 specimens were tested.

In reference to similar study concerning more widely known types of FRPs (with carbon and glass fibres) [12], extended analysis of concrete properties investigations was performed, including its heat transfer parameters (conductivity and heat capacity). Also, as limited data is available in terms of elasticity modulus values changes for FRP at elevated temperatures, the Digital Image Correlation (DIC) was used for strain analysis in this study.

Materials and methods

Concrete. There was used following recipe for concrete (per 1 m³): tap water -138 kg, cement CEM II/A-M(S-LL) 52.5 N -277 kg, sand (0 -2 mm) -688 kg, gravel (2 -8 mm) -1348 kg, superplasticizer -3 kg. The relative humidity of sand was equal to 0.15% and for gravel it was 0.26%.

Along with preparing the specimens for tests of BFRP bars with concrete cover (Fig. 1), additional specimens of pure concrete were made. After storing them in air-dry conditions (with BFRP bars in concrete embedment) additional investigations were performed: compressive [13] and tensile [14, 15] strength, conductivity, and volume heat capacity [16].

K-type thermocouple/ termopara typu K concrete cover/otulina betonowa 40 x 40 mm 330 ± 15 mm 1100 ± 10 mm



Tensile tests. There were used BFRP bars made with epoxy matrix, which was also subject of authors' previous studies $[17 \div 19]$. Firstly, at the end of the BFRP bars (with the length of 1100 ± 10 mm), there were mounted anchorage systems enabling mounting the specimens in hydraulic press (steel pipes with the length of 330 ± 15 mm filled with expansive mortar). The diameter values of the bars were measured in 5 places along each specimen, however for elasticity modulus and tensile strength calculations, nominal value of the diameter (6 mm) was used. Then, for specimens planned to be tested with concrete embedment, two K-type thermocouples were mounted at the surface of each BFRP bar, in the middle of its length. Prior to tensile tests, the black-white pattern was prepared on the surface of the specimens to enable measurements of the strains.

The specimens were divided into three groups, 4 specimens in each group: (1) tested in room temperature conditions, (2) tested in steady-state conditions after 20 minutes of heating up to 200°C and (3) tested in steady-state conditions after 20 minutes measured from the time, when 200°C was związane z odpornością ogniową takich elementów konstrukcyjnych należą do największych wyzwań i na ogół nie zostały poruszone w tych dokumentach. W artykule opisano badania zachowania się prętów BFRP przy rozciąganiu podczas nagrzewania do 200°C w stanie ustalonym, a także znaczenie otuliny betonowej jako izolacji termicznej. Wykonano badania dwunastu próbek.

W odniesieniu do podobnego badania, dotyczącego znanych rodzajów FRP (z włóknami węglowymi oraz szklanymi) [12], przeprowadzono rozszerzoną analizę badań właściwości betonu, w tym jego przewodności i pojemności cieplnej. W związku z tym, że dostępne są ograniczone dane dotyczące zmian wartości modułu sprężystości BFRP w podwyższonej temperaturze, do analizy odkształceń zastosowano w badaniu cyfrową korelację obrazu (DIC).

Materiały i metody

Beton. Receptura na 1 m³ była następująca: woda wodociągowa – 138 kg; cement CEM II/A-M (S-LL) 52,5 N – 277 kg; piasek 0 – 2 mm – 688 kg; żwir 2 – 8 mm – 1348 kg; superplastyfikator – 3 kg. Wilgotność względna piasku wynosiła 0,15%, a żwiru 0,26%.

Wraz z przygotowaniem próbek do badania prętów BFRP w otulinie betonowej (rysunek 1), wykonano dodatkowe próbki betonu. Po przechowywaniu ich w warunkach powietrzno-suchych (wraz z prętami BFRP w otulinie) przepro-

> wadzono uzupełniające badania wytrzymałości na ściskanie [13] i rozciąganie [14, 15] oraz przewodności i pojemności cieplnej [16].

> Próby rozciągania. Zastosowano pręty BFRP z matrycą epoksydową, które były również przedmiotem wcześniejszych badań [17 ÷ 19]. W pierwszej kolejności zamontowano,

na końcach prętów BFRP (o długości 1100 ± 10 mm), systemy kotwienia umożliwiające montaż próbek w prasie hydraulicznej (rury stalowe o długości 330 ± 15 mm wypełnione zaprawą ekspansywną). Średnicę prętów mierzono w pięciu miejscach wzdłuż każdej próbki, a do obliczeń modułu sprężystości i wytrzymałości na rozciąganie przyjęto nominalną wartość 6 mm. Następnie, w przypadku próbek planowanych do badania w otulinie betonowej, zostały zamontowane dwie termopary typu K na powierzchni każdego pręta BFRP, w połowie długości, przed jego zabetonowaniem. Przed przystąpieniem do prób rozciągania na powierzchnię próbek naniesiono czarno-biały wzór, aby umożliwić pomiar odkształceń.

Próbki podzielono na trzy grupy, po 4 próbki w każdej, testowane: 1) w warunkach temperatury pokojowej; 2) w warunkach ustalonych po 20 min podgrzewania do 200°C oraz 3) w warunkach ustalonych po 20 min mierzonych od czasu, gdy osiągnięto 200°C na powierzchni pręta BFRP/betonu. Przekrój poprzeczny otuliny betonowej miał kształt kwa-

5/2025 (nr 633)

achieved at BFRP bar/concrete surface. The concrete sleeves' cross sections were in the shape of a square with the side of 40 mm. The predetermined value of temperature at BFRP bar/concrete surface was achieved after about 40-55 minutes (regarding the specimen). The rate of loading was equal to 2 mm/min. The medium value of the temperature in the room during the tests was 12°C. For all the specimens apart from specimen no 5, the ceramic wool and aluminium foil were used to protect the anchorage zones from excessive heating. The commercial DIC software was used for the calculation of strains.

Results

The mean value of measured diameter of the bars was equal to 6.3 mm with the standard deviation of 0.21 mm, which is 5% higher than nominal value equal to 6.0 mm. The results of concrete performance tests are summarized in the Tab. 1. The compressive strength of concrete (tested at cube 100 specimens) was equal to about 50 MPa at the day of the investigations on BFRP in concrete sleeves. Reduction ratios for tensile strength of BFRP specimens heated up to 200°C were equal to 52.0% and 47.3% for BFRP specimens with and without concrete embedment, respectively (Tab. 2). Also, intense deterioration of material was noted for heated specimens, especially in upper part of the specimen (photography).

Elasticity modulus values were determined for bare bars based on stress-strain relations calculated with the use of DIC method (Tab. 2, Figs 2-3). For bars with concrete sleeves the strain values also were measured (at the surface of the specimens), but dratu o boku 40 mm. Przyjętą wartość temperatury na powierzchni pręta BFRP/betonu osiągnięto po 40 – 55 min (w zależności od próbki). Szybkość obciążenia wynosiła 2 mm/min, a średnia wartość temperatury w pomieszczeniu podczas badań 12°C. W przypadku wszystkich próbek, z wyjątkiem próbki nr 5, użyto wełny ceramicznej i folii aluminiowej w celu zabezpieczenia stref kotwienia przed nadmiernym nagrzewaniem. Do obliczania odkształceń zastosowano oprogramowanie komercyjne wykorzystujące metodę DIC.

Wyniki

Średnia wartość zmierzonej średnicy prętów wynosiła 6,3 mm przy odchyleniu standardowym 0,21 mm, czyli była o 5% większa od wartości nominalnej równej 6,0 mm. Wyniki badań betonu zestawiono w tabeli 1. Wytrzymałość na ściskanie (badana na próbkach sześciennych o boku 100 mm) wynosiła w dniu badania BFRP w otulinie betonowej ok. 50 MPa. Współczynniki redukcji wytrzymałości na rozciąganie próbek BFRP podgrzanych do 200°C miały wartość 52,0% i 47,3% odpowiednio w przypadku próbek z otuliną betonową i bez (tabela 2). W próbkach podgrzanych stwierdzono znaczną degradację materiału, szczególnie w górnej części próbki (fotografia).

Wartości modułu sprężystości wyznaczono w przypadku prętów bez otuliny na podstawie relacji naprężenie-odkształcenie obliczonych metodą DIC (tabela 2, rysunki 2 i 3). W przypadku prętów z otuliną zmierzono również

Parameter/ Parametr	Specimens – count, type/ Próbki – liczba, rodzaj	Conditioning/Warunki przechowywania próbek przed badaniem	Mean value/ Wartość średnia	Standard devia- tion/Odchylenie standardowe
Compressive strength/ Wytrzymałość na ściskanie	5, cube 100 mm/ 5, sześcian 100 mm	after demoulding (2 days after concrete pouring)/po wyjęciu z formy (2 dni po betonowaniu)	23,58 [MPa]	0,586 [MPa]
	15, cube 100 mm/ 15, sześcian 100 mm	air-dry (8 days after concrete pouring)/warunki powietrzno-suche (8 dni po betonowaniu)	50,55 [MPa]	1,522 [MPa]
	6, cube 100 mm/ 6, sześcian 100 mm	air-dry, then heated up to 200°C for 1 h right before the tests (9 days after concrete pouring)/warunki powietrzno-suche, następnie podgrzewanie do temperatury 200°C przez 1 godzinę bezpośrednio przed badaniami (9 dni po betonowaniu)	34,69 [MPa]	1,677 [MPa]
Spitting tensile strength/ Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu	5, cube 100 mm/ 5, sześcian 100 mm	air-dry (9 days after concrete pouring)/ warunki powietrzno-suche (9 dni po betonowaniu)	4,02 [MPa]	0,626 [MPa]
	5, cube 100 mm/ 5, sześcian 100 mm	air-dry, then heated up to 200°C for 1 h right before the tests (9 days after concrete pouring)warunki powietrzno-suche, następnie podgrzewanie do temperatury 200°C przez 1 godzinę bezpośrednio przed badaniami (9 dni po wylaniu betonu)	2,10 [MPa]	0,273 [MPa]
Tensile strength in flexure/Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu	3, 100 mm x 100 mm x 500 mm	air-dry (9 days after concrete pouring)/ warunki powietrzno-suche (9 dni po wylaniu betonu)	4,97 [MPa]	0,705 [MPa]
	3, 100 mm x 100 mm x 500 mm	air-dry, then heated up to 200°C for 1 h right before the tests (9 days after concrete pouring)warunki powietrzno-suche, następnie podgrzewanie do temperatury 200°C przez 1 godzinę bezpośrednio przed badaniami (9 dni po wylaniu betonu)	3,17 [MPa]	0,258 [MPa]
Thermal conductivity/ Przewodność cieplna	1 cube 100 specimen 3 measurements at 3 faces (total of 9 measurements)/	air-dry (9 days after concrete pouring)/	2,509 W/(m•K)	0,1703 W/(m•K)
Volume heat capacity/ Objętościowa pojem- ność cieplna	1, sześcian 100 mm 3 pomiary na 3 ściankach (łącznie 9 pomiarów)	warunki powietrzno-suche (9 dni po wylaniu betonu)	1,896 µJ/(m³• K)	0,2783 μJ/(m³•K)

Table 1. Results on concrete performance Tabela 1. Wyniki badań betonu

Table 2. Results for BFRP bars (\$6 mm nominal) in tension at room temperature and during heating up to 200°C (bare and with concrete embedment)

Tabela 2. Wyniki pretów BFRP (\$6 mm nominalnie) przy rozciąganiu w temperaturze pokojowej i podczas ogrzewania do 200°C (z otulina lub bez otuliny)

No spe- cimen/Nr próbki	Description/Opis	Maximum force [kN]/Siła maksy- malna [kN]	Tensile strength [MPa]/ Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]		Elasticity modulus [GPa]/ Moduł sprężystości [GPa]		
1		12,93	457,2		no meaningful data to report/brak istotnych		
2	with concrete cover, tested at 200°C/	10,46	369,8	mean value: 410.7, standard devia-			
3	otulina betonowa prętow, badane w temperaturze 200°C	11,49	406,3	odchylenie standardowe: 35,8	danych do przedstawienia		
4		11,58	409,4				
5	tested at 200°C/badane w tempe- raturze 200°C	12,38	437,8	mean value: 450.8, standard devia- tion: 51.4/wartość średnia: 450,8, odchylenie standardowe: 51.4	41,9		
6		10,91	385,7		53,5	mean value: 41.1, standard devia- tion: 9.4/wartość średnia: 41,1, odchylenie standardowe: 9,4	
7		14,28	504,9		37,9		
8		13,43	475,0	•	31,0		
9	tested at room temperature/badane w temperaturze pokojowej	22,84	807,8	mean value: 854.9, standard devia- tion: 4.4/wartość średnia: 854,9, odchylenie standardowe: 4,4	39,0		
10		26,50	937,3		48,2	mean value: 42.0, standard devia-	
11		23,63	835,7		42,0	tion: 4.4/wartość średnia: 42,0, odchylenie standardowe: 4,4	
12		23,72	838,9	•	38,8		

their values were very small (up to 2‰), which might prove loss of load transferring from bars to concrete cover due to bond loss and should be furtherly investigated in such future tests.

In the Fig. 4 there are shown an heating: temperature values at BFRP bar podczas ogrzewania



Failure mode of BFRP bars - specimen tested during heating no. 7

exemplary temperature profiles of Postać zniszczenia pretów BFRP – próbka nr 7 badana

odkształcenia (na powierzchni próbek), ale ich wartości były bardzo małe (do 2‰), co może świadczyć o utracie możliwości przenoszenia obciążenia z prętów na otulinę z powodu utraty nośności styku. Powinno to być przedmiotem



Fig. 2. Tensile performance of bare BFRP bars at room temperature (specimens no 9-12)

Rys. 2. Wyniki testów rozciągania prętów BFRP bez otuliny w temperaturze pokojowej (próbki nr 9-12)

surface for specimen with concrete cover and chamber values temperature for specimens with and without concrete cover.

Discussion

The results for BFRP bars tested in this study are in the same trend as earlier published results, however in lower





range in terms of their reten- Rys. 4. Profile temperatury - próbkinr 1 (z otuling) inr 6 (pret bez otuliny) ne wyniki dostępne w literaturze,

analiz w dalszych badaniach.





Rys. 3. Wyniki testów rozciągania prętów BFRP bez otuliny podczas nagrzewania do 200°C (próbki nr 5-8)

> Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe profile temperatury podczas ogrzewania na powierzchni pręta BFRP (próbki z otuliną) oraz w komorze (próbki z otuliną i bez).

Dyskusja

Wyniki badania prętów BFRP, będących przedmiotem artykułu, prezentują taki sam trend, jak in-

tion ratios after heating (Fig. 5). Contrary to expectations, no significant positive impact of concrete cover on the tensile performance was noted (even marginally lower values of tensile strength were gained) for specimens with concrete embedment. This indicates that the role of concrete cover in that case should be seen rather in postponing the process of heating of the BFRP bars (thermal insulation) than in contributing to transfer of the tensile loads. Negligible values of strains were measured with DIC method for embedded ale w dolnej części zakresu pod względem ich współczynników retencji po podgrzaniu (rysunek 5). Wbrew oczekiwaniom nie stwierdzono istotnego pozytywnego wpływu otuliny na wytrzymałość na rozciąganie próbek z otuliną (uzyskano nawet nieznacznie mniejsze wartości wytrzymałości). Wskazuje to, że otulina raczej opóźnia proces nagrzewania prętów BFRP, niż przyczynia się do przenoszenia obciążeń rozciągających. Znikome wartości odkształceń uzyskano również w pomiarach metodą DIC w przypadku próbek z otuliną, prawdopodobnie

specimens, which may be attributed to loss of bond between bars and concrete and has also been noticed in other studies [20 ÷ 22]. Low impact of increased temperature on elasticity modulus values noted in this study (difference equal to 2.2%) is also in line with other studies (e. g. [23]).

Comparison of tensile strength reduction tested in this study and earlier studied reduction of compressive strength (Fig. 6) leads to a conclusion that while in the case of compressive strength almost no load can be transferred at 200°C. considerable level of stressed can be achieved for tension (about 450 MPa).





Rys. 5. Współczynniki zachowania wytrzymalości na rozciąganie prętów BFRP podczas ogrzewania – badanie na tle innych badań [12, $22 \div 24$]



Fig. 6. Comparison between tensile (this study) and compressive (previous authors' studies [17 \div 19]) strength values for BFRP bars at room temperature and during heating Rys. 6. Porównanie wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie wg [17 \div 19] – wartości wytrzymałości prętów BFRP w temperaturze pokojowej i podczas ogrzewania

w wyniku utraty przyczepności między prętami a betonem, co potwierdzają dane literaturowe [20 ÷ 22]. Niewielki wpływ podwyższonej temperatury na wartości modułu sprężystości (różnica 2,2%) jest również zgodny z wcześniejszymi badaniami, np. [23].

Na podstawie wyników badań własnych i danych literaturowych (rysunek 6) stwierdzono. że podczas gdy w przypadku wytrzymałości na ściskanie w temperaturze 200°C praktycznie nie jest możliwe przenoszenie obciążeń, to wciąż można osiągnąć znaczny poziom napreżeń przy rozciąganiu (ok. 450 MPa).

Summary and conclusions

1 The reduction ratios resulting from temperature increase for BFRP in tension were equal to 52.0% and 47.3% for BFRP specimens with or without concrete embedment, respectively.

2. There was nonobvious performance of concrete cover e.g. lack of influence on the maximum value of stresses observed. This may be attributed to the loss of bond between concrete and BFRP bars, as also negligible values of strains were noted in that case at the concrete surface.

3. The role of concrete cover should be mostly seen in postponing excessive heating (thermal insulation) rather than in contribution to load transfer in tension.

4. The process of achieving predetermined value of temperature took from 40 up to 55 minutes when specimens

Podsumowanie i wnioski

1. Współczynniki redukcji wynikające ze wzrostu temperatury wynosiły przy rozciąganiu 52,0% i 47,3% odpowiednio w przypadku próbek BFRP z otuliną betonową i bez.

2. Zaobserwowano nieoczywiste zachowanie otuliny betonowej, np. brak wpływu na maksymalną wartość naprężeń. Może to wynikać z utraty wiązania między otuliną a prętami BFRP, ponieważ w tym przypadku odnotowano również znikome wartości odkształceń na powierzchni betonu.

 Rola otuliny powinna być postrzegana głównie w opóźnianiu nadmiernego nagrzewania (jako izolacja cieplna), a nie w przenoszeniu obciążenia przy rozciąganiu.

with concrete sleeves exposed to 200°C in the heating chamber. However, it is worth mentioning that in analyzed case no cracking was observed (also in DIC) while in real construction element such crack presence may lead to intensification of heating as well as combustion of the bars. Obviously, temperatures in fire might also be almost immediately much higher than 200°C

Therefore, future studies directions are as follows:

• numerical analysis of the process (using values measured for concrete presented in table 1 and comparing to results from thermocouples – Fig. 4);

• increase of temperature range in the experimental part of investigations;

• full-scale fire resistance tests of concrete structural elements with BFRP internal reinforcement.

Acknowledgements

This paper was co-financed under the research grant of the Warsaw University of Technology supporting the scientific activity in the discipline of Civil Engineering, Geodesy and Transport. The research was carried out on devices cofounded by the Warsaw University of Technology within the Excellence Initiative: Research University (IDUB) programme.

> Received: 03.01.2025 Revised: 10.03.2025 Published: 22.05.2025

4. W warunkach średniej temperatury 200°C w komorze grzewczej, proces nagrzewania próbki z otuliną betonową do poziomu tej temperatury trwał 40 – 55 min. Warto jednak nadmienić, że w analizowanym przypadku nie zaobserwowano rys (również w DIC). W rzeczywistym elemencie konstrukcyjnym ich obecność może przyczyniać się do intensyfikacji nagrzewania i spalania prętów, a temperatura w warunkach pożarowych przewyższa bardzo szybko 200°C.

Dzięki otrzymanym wynikom zaproponowano następujące kierunki przyszłych badań:

• analiza numeryczna procesu (z wykorzystaniem wartości zmierzonych w przypadku betonu, przedstawionych w tabeli 1 i porównanie z wynikami z termopar – rysunek 4);

• zwiększenie temperatury w eksperymentalnej części badań;

• pełnowymiarowe badania odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych z wewnętrznym zbrojeniem BFRP.

Podziękowanie

Praca została dofinansowana w ramach grantu badawczego Politechniki Warszawskiej wspierającego działalność naukową w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. Badania przeprowadzono na urządzeniach współfinansowanych przez Politechnikę Warszawską w ramach programu Inicjatywa Doskonałości: Uczelnia Badawcza (IDUB).

> Artykuł wpłynął do redakcji: 03.01.2025 r. Otrzymano poprawiony po recenzjach: 10.03.2025 r. Opublikowano: 22.05.2025 r.

Literature

[1] Maraveas C, Miamis K, Vrakas AA. Fiber-reinforced polymer-strengthened/reinforced concrete structures exposed to fire: A review. Struct. Eng. Int. J. Int. Assoc. Bridg. Struct. Eng. 2012; DOI: 10.2749/101686612X13363929517613.

[2] Firmo JP, Correia JR, Bisby LA. Fire behaviour of FRP-strengthened reinforced concrete structural elements: A state-of-the-art review. Compos. Part B Eng. 2015; DOI: 10.1016/j.compositesb. 2015.05.045.

[3] Naser MZ, Hawileh RA, Abdalla JA. Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review. Eng. Struct. 2019; DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109542.

[4] CSA-S806-02 Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers. Ontario: Canadian Standards Association, 2002.

[5] CAN/CSA-S6-06 Canadian highway bridge design code. Ontario: Canadian Standards Association, 2006.

[6] ACI 440.1R-06 Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. ACI Comittee 440, American Concrete Institute (ACI), 2006.

[7] JSCE Recommendation for design and construction of concrete structures using continous fiber reinforcing materials. Tokyo: Research Comittee on Continous Fiber Reinforcin Mateials, Japan Society of Civil Engineers, 1997.

[8] CNR-DT 203/2006 Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars. Rome: National Research Council, 2006.

[9] Burgoyne C et al., Technical report: FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement in RC structures. fédération internationale du béton (fib). 2007; DOI: 10.1371/journal.pntd. 0001792.

[10] Walraven J. fib Model Code for Concrete Structures 2010: mastering challenges and encountering new ones, Structural Concrete. Wiley Online Library. 2013. [Online]. Available: 10.1002/suco. 201200062

[11] EN 1992-1-1:2023, Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.

[12] Najafabadi EP, Oskouei AV, Khaneghahi MH, Shoaei P, Ozbakkaloglu T. The tensile performance of FRP bars embedded in concrete under elevated temperatures. Constr. Build. Mater. 2019; DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2019.03.239.

[13] EN 12390-3:2019 Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens. 2019.

[14] EN 12390-6:2011 Testing hardened concrete – Part 6: Tensile splitting strength of test specimens. 2011.

[15] EN 12390-5:2019 Testing hardened concrete – Part 5: Flexural strength of test specimens. 2019.

[16] Prałat K, Ciemnicka J, Koper A, Buczkowska KE, Łoś P. Comparison of the Thermal Properties of Geopolymer and Modified Gypsum. Polymers (Basel). 2021; DOI: 10.3390/polym13081220.

[17] Wydra M, PhD thesis: Fire resistance of concrete columns reinforced with BFRP bars. 2023.

[18] Wydra M et al. Basalt Fibre Reinforced Polymer bars as main reinforcement of axially compressed concrete column – experimental and numerical considerations of fire resistance. Fire Saf. J. 2023; DOI: 10.1016/j. firesaf. 2023.103898.

[19] Wydra M, Dolny P, Sadowski G, Grochowska N, Turkowski P, Fangrat J. Analysis of Thermal and Mechanical Parameters of the BFRP bars. Mater. Proc. 2023, [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/materproc2023013024.

[20] Li C, Gao D, Wang Y, Tang J. Effect of high temperature on the bond performance between basalt fibre reinforced polymer (BFRP) bars and concrete. Constr. Build. Mater. 2017; DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2017.02.125.

[21] Rami Hamad JA, Megat Johari MA, Haddad RH. Mechanical properties and bond characteristics of different fiber reinforced polymer rebars at elevated temperatures. Constr. Build. Mater. 2017; DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2017.03.113.
[22] Rosa IC, Firmo JP, Correia JR, Barros JAO. Bond behaviour of sand coated GFRP bars to concrete at elevated temperature – Definition of bond vs. slip relations. Compos. Part B Eng. 2019; DOI: 10.1016/j.compositesb. 2018.10.020.
[23] Hajiloo H, Green MR, Gale J. Mechanical properties of GFRP reinforcing bars at high temperatures. Constr. Build. Mater. 2018; DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2017.12.025.

[24] Ashrafi H, Bazli M, Najafabadi EP, Vatani Oskouei A. The effect of mechanical and thermal properties of FRP bars on their tensile performance under elevated temperatures. Constr. Build. Mater. 2017; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.160.