

dr inż. Małgorzata Wydra^{1*)}

ORCID: 0000-0002-4629-9656

dr hab. inż. Jadwiga Fangrat, prof. ITB²⁾

ORCID: 0000-0002-7871-0032

Concrete construction elements with fibre reinforced polymer reinforcement under fire conditions

Betonowe elementy konstrukcyjne ze zbrojeniem z polimeru wzmocnionego włóknem w warunkach pożarowych

DOI: 10.15199/33.2025.07.24

Abstract. Investigations on Fibre Reinforced Polymers (FRPs) at ambient temperature have already proved their effectiveness as an internal reinforcement as an alternative to traditional steel reinforcement because of their high mechanical performance and durability. However, their performance at elevated and high temperatures requires proper understanding to enable safe design methods, as FRPs are highly vulnerable even to remotely elevated temperatures. In addition, aspects related to the thermal conductivity and combustibility should be carefully considered. This article aims to present up-to-date research on reduced-scale and full-scale investigations of internally FRP-reinforced concrete structural elements as well as conclusions on the directions of further research. In terms of mechanical performance, post-heated tests and simultaneous thermo-mechanical loading (at transient and steady states) were analysed.

Keywords: concrete; Fibre Reinforced Polymer; elevated temperature; fire performance; full-scale tests; reduced-scale tests.

Fibre Reinforced Polymers (FRPs) are gaining interest in the construction industry owing to their favourable mechanical properties. However, the application of FRPs inside buildings is still limited because of their problematic fire performance which narrows their application potential and has been an area of extensive research over the last decade. In the concrete construction industry, they are typically used in one of three ways: (1) Externally Bonded or (2) Near Surface Mounted systems, which aim to strengthen existing elements, and (3) internal reinforcement made of composite instead of steel.

The last trend, which is the subject of this study, involves the replacement of steel reinforcement bars with non-metallic bars before casting the structural element. Such an exchange might be considered advantageous in harsh environments, where high corrosive resistance is required. Using FRPs as internal reinforcements seems to be attractive owing to their beneficial mechanical performance, high durability, and electrical indif-

Streszczenie. Badania dotyczące kompozytów z polimerów wzmocnianych włóknem (ang. *Fibre Reinforced Polymer*) w temperaturze pokojowej wykazały ich efektywność jako wewnętrznego zbrojenia jako alternatywę dla tradycyjnego zbrojenia stalowego dzięki swoim wysokim parametrom mechanicznym i trwałości. Jednakże, ich zachowanie w podwyższonych i wysokich temperaturach wymaga wciąż odpowiedniego zrozumienia, aby umożliwić bezpieczne metody projektowania, ponieważ FRP są bardzo wrażliwe nawet na nieznacznie podwyższone temperatury. Ponadto należy dokładnie rozważyć aspekty związane z przewodnością cieplną i palnością. Artykuł ma na celu przedstawienie aktualnego przeglądu stanu wiedzy dotyczącego badań w skali zredukowanej oraz pełnoskalowych elementów konstrukcyjnych betonowych z wewnętrznym zbrojeniem FRP oraz wnioski dotyczące kierunków dalszych badań. Pod kątem parametrów mechanicznych przeanalizowano wyniki badań po wygrzewaniu oraz pod wpływem jednoczesnego obciążenia termomechanicznego (w stanach nieustalonym i ustalonym).

Słowa kluczowe: beton, polimer wzmocniany włóknem; podwyższona temperatura; zachowanie w pożarze; badania pełnoskalowe; badania w zredukowanej skali.

Polimery wzmocnione włóknami (FRP) cieszą się coraz większym zainteresowaniem w przemyśle budowlanym ze względu na swoje korzystne właściwości mechaniczne. Jednak zastosowanie FRP w budownictwie jest nadal ograniczone ze względu na problemy związane z odpornością ogniową, co zawęża ich potencjał aplikacyjny i było przedmiotem szeroko zakrojonych badań w ciągu ostatniej dekady. W przypadku betonowych elementów konstrukcyjnych kompozyty są zwykle stosowane na jeden z trzech sposobów: (1) systemy montowane zewnętrznie (ang. *Externally Bonded – EB*) lub (2) systemy montowane blisko powierzchni (ang. *Near Surface Mounted – NSM*), które mają na celu wzmocnienie istniejących elementów, oraz (3) zbrojenie wewnętrzne wykonane z kompozytu zamiast stali.

Ostatni trend, który jest przedmiotem niniejszego opracowania, polega na zastępowaniu stalowych prętów zbrojeniowych prętami niemetalowymi przed zabetonowaniem elementu konstrukcyjnego. Taka wymiana może być uważana za korzystną w trudnych warunkach, gdzie wymagana jest wysoka odporność na korozję. Stosowanie FRP jako zbrojenia wewnętrznego wydaje się być atrakcyjne ze względu na korzystne para-

¹⁾ Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Mechanics and Petrochemistry

²⁾ Building Research Institute

*) Correspondence address: Małgorzata.Wydra@pw.edu.pl

ference. Additionally, the environmental friendliness of FRP reinforcement remains high compared to that of traditional reinforcement [1 – 4].

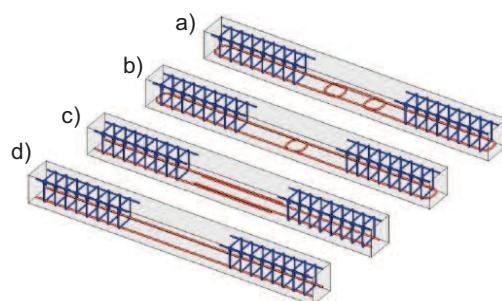
Owing to their high reliability, FRP bars have been widely used in bridges, viaducts, open-air garages [5 – 7] and other constructions, in which extensive corrosion resistance is important. An increase in construction durability results in a reduction of necessary renovation work. Usage possibilities for offshore [1] and geotechnical [8] structures have also been reported. Concrete elements incorporating FRP bars instead of steel bars can be an attractive solution when electrical indifference is required. Up-to-date research has also proved that FRP composites can meet the requirements for tendons in prestressed structural elements [9].

Additionally, the environmental friendliness of FRP reinforcement remains high compared with that of traditional reinforcement. The ease of crushing the structural elements with FRP after demolition makes them suitable for further reuse (bars do not need to be separated before crushing, as in the case of steel reinforcement) [2]. Moreover, the energy and cost consumption rates of the production processes are significantly lower than those of iron and stainless steel bars [1]. Lifecycle assessment analyses of construction with FRPs and their contribution to sustainable development have been widely discussed [3, 4].

In this study, the authors discuss results from previous studies that experimentally and theoretically examined the behaviour of concrete structural elements with FRP internal reinforcement subjected to elevated and high temperatures. The need for future research in this area has also been highlighted.

Concrete structural elements with internal FRP reinforcement

In the case of thermal analysis of concrete structural elements, in which traditional steel reinforcement is replaced by FRP bars, the significance of concrete cover thickness has already been underlined [10] (similar to steel-reinforced structural elements). An adequate concrete cover may provide appropriate thermal performance, resulting in the ability to sustain service loads during fire exposure [10]. A few experimental studies and numerical investigations have been summarised in [10], most of which pertain to beams or slabs rather than columns. The necessity of considering the presence of FRP bars and monitoring the temperature through the length of the element is underlined. Thermal stresses on FRP bar – concrete interfaces, which may result in additional cracking, should not be neglected. The summary of the latest research on internally FRP-reinforced concrete element are presented in table.



Schemes of analysed reinforcement arrangements; own preparation on the basis of [32]; blue – steel reinforcement; red – FRP reinforcement; reinforcement in tension: a) three closed loops; b) two closed loops; c) straight bars with 440 mm long splice; d) straight rebars

Schematy analizowanych układów zbrojenia, opracowanie własne na podstawie [32]; niebieski – zbrojenie stalowe; czerwony – zbrojenie FRP; zbrojenie rozciągane: a) trzy zamknięte pętle; b) dwie zamknięte pętle; c) pręty proste z łączeniem na zakład o długości 440 mm; d) pręty proste

metry mechaniczne, wysoką trwałość i obojętność elektryczną. Ponadto FRP jest uznawane za materiał przyjazny dla środowiska w porównaniu z tradycyjnym zbrojeniem [1 – 4].

Ze względu na wysoką niezawodność, pręty FRP znajdują szerokie zastosowanie w mostach, wiaduktach, otwartych garażach [5 – 7] i innych konstrukcjach, w których ważna jest wysoka odporność na korozję. Wzrost trwałości konstrukcji skutkuje redukcją koniecznych prac remontowych. Znane są również możliwości wykorzystania FRP w konstrukcjach morskich [1] i geotechnicznych [8]. Elementy betonowe zawierające pręty FRP zamiast prętów stalowych mogą być atrakcyjnym rozwiązaniem, gdy wymagana jest obojętność elektryczna. Dotychczasowe badania dowiodły również, że kompozyty FRP mogą spełniać wymagania stawiane ciągnom w sprężonych elementach konstrukcyjnych [9].

Zbrojenie FRP jest wysoce przyjazne środowisku w porównaniu z tradycyjnym zbrojeniem stalowym. Łatwość kruszenia elementów konstrukcyjnych z FRP po rozbiórce sprawia, że nadają się one do dalszego ponownego wykorzystania (pręty nie muszą być oddzielane przed skruszeniem, jak w przypadku zbrojenia stalowego) [2]. Co więcej, wskaźniki zużycia energii i kosztów w procesach produkcyjnych są znacznie niższe niż w przypadku prętów na bazie żelaza i ze stali nierdzewnej [1]. W publikacjach [3, 4] szeroko omówiono analizy oceny cyklu życia konstrukcji z wykorzystaniem kompozytów FRP i ich wkładu w zrównoważony rozwój.

W niniejszej pracy autorzy omawiają wyniki wcześniejszych badań, w których eksperymentalnie i teoretycznie analizowano zachowanie się betonowych elementów konstrukcyjnych ze zbrojeniem wewnętrznym FRP poddanych działaniu podwyższonych i wysokich temperatur. Zwrócono również uwagę na potrzebę przyszłych badań w tej dziedzinie.

Betonowe elementy konstrukcyjne z wewnętrznym zbrojeniem FRP

W przypadku analiz termicznych betonowych elementów konstrukcyjnych, w których tradycyjne zbrojenie stalowe zostało zastąpione prętami FRP, podkreślone jest znaczenie grubości otuliny betonowej [10] (podobnie jak w przypadku elementów konstrukcyjnych zbrojonych stalą). Odpowiednia otulina betonowa może zapewnić wymagane zachowanie w warunkach nagrzewania, co skutkuje zdolnością do wytrzymywania obciążeń eksploatacyjnych podczas narażenia na działanie ognia [10]. Kilka badań eksperymentalnych i analiz numerycznych zostało podsumowanych w [10], z których większość dotyczy belek lub płyt, nie zostały jednak uwzględnione słupy. Podkreślono konieczność uwzględnienia obecności prętów FRP i monitorowania temperatury na całej długości elementu. Nie należy również pomijać wpływu naprężeń termicznych na powierzchni styku pręt-beton FRP, które mogą powodować dodatkowe zarysowania (tabela).

Summary of the latest research on internally FRP-reinforced concrete elements at/after high-temperature exposure – to be continued on page 196

Podsumowanie najnowszych badań dotyczących elementów betonowych z wewnętrznym zbrojeniem z FRP w czasie/po ekspozycji na wysoką temperaturę – cd. na str. 196

Analysed elements 1	Test procedure/methods 2	Main findings 3	Ref. 4
– concrete decks doubly reinforced with GFRP bars	– a detailed transient thermal analysis – top fire situation Model developed in ANSYS-Release Version, validated with the use of up-to-date literature data [11]	– tables including fire resistance (according to ASTM E119 [12], ASTM 1529 [13], HCM and RWS [14] fire models) as a function of top concrete cover and critical design temperature of the bars were proposed; – loss of mechanical properties of GFRP concerns mostly serviceability issues the increased surface cracks significantly increased deflections and does not cause a threat of deck collapse	[15] (fire resistance, full-scale RC slabs)
– thin concrete panels (170 cm x 40 cm x 4 cm) with GFRP unidirectional bars (7 x 8 mm bars); – two types of 8 mm bars were examined (Schock ComBAR® and FiReP® Rebar P) with two concrete cover thicknesses – 5 mm and 10 mm	– panels were loaded till the established part of bending capacity, then the lower surface was heated up to 210°C (so in bars temperature near glass transition of the bars was established), then the temperature was sustained at a constant level for 65 min; – finally, mechanical flexural tests were performed in four-point bending tests at ambient temperature	– external surface finishing (differing two types of used bars) appeared to have a significant influence on the bending response of panels concerning initial stiffness and local level of strain; – reduction of initial global stiffness was observed as a result of the loading heating program performed in the first phase of the experiment; – any evidence of bars' degradation or bar-concrete interface was noted; – all specimens failed by concrete crushing in post-heating flexural tests with almost intact rebars	[16] (post-heat, non-structural elements)
– 500 mm x 60 mm x 500 mm; – geopolymer concrete and basalt or glass 6 mm FRP bars	– specimens heated up to 650°C, then cooled down and mechanical load applied	– similar performance for slabs tested at ambient conditions and after exposure to 350°C, while significantly different after 550 and 650°C	[17] (post heat, reduced scale RC slabs)
– 1200 mm x 200 mm x 3900 mm (reinforced with 16 mm GFRP bars spaced by 100 mm); – 1250 mm x 180 mm x 4000 mm (reinforced with 12 mm GFRP bars spaced by 125 or 200 mm)	– FE simulation conducted for FRP reinforced one-way RC slabs submitted to simultaneous thermal and mechanical load; – two steps (as usual for RC structures): (1) thermal analysis was used in order to determine values of nodal temperatures resulting from the heat transfer, (2) stress calculations based on the previous temperature distribution results; – validation on experimentally available data [18, 19]	– direct relation between temperature distribution within unexposed anchor zones and time till failure has been confirmed; – proposed modification of heat transfer parameters enabled improvement of the thermal analysis accuracy in that matter; – the model appeared to accurately simulate the effect of “thermal bowing”, which is a rapid increase of deflections in mid-span submitted to rapid heating during a fire; – more material tests of the thermal expansion coefficient are recommended, which might result in better accuracy of the model, as it had the biggest influence on errors during the analysis	[20] (fire resistance, full-scale RC slab)
– the presence of so-called “cold anchorages” analysed; – RC slabs reinforced with sand-coated GFRP bars; – the influence of concrete cover thickness, presence and length of overlapping directly exposed to fire and concrete strength have been taken into account; – bars continuous or spliced; – slabs 250 mm x 110 mm x 1100 mm (width x height x exposed span) – 6 mm GFRP bars spaced by 160 mm	– ISO 834 [21] standard fire and sustained mechanical load in four-point bending test	– providing a relatively low temperature in the anchorage zone (up to 108°C) can result in providing relatively long fire resistance of the element (from 80 to 150 min); – as a result of applying “cold anchorages” loss of resistance occurred long after debonding of FRP in the midspan; – the mechanism of failure was tensile rupture of reinforcement; – introducing overlapping inside the parts of the element exposed to direct heating, resulting in a reduction of fire resistance to less than 20 min, which underlines the importance of proper consideration of this detail in future design guidelines; – as assumed, lowering the concrete cover resulted in a decrease in fire resistance, which was accompanied by an intensity of the cracking process leading to an increase in FRP bars' heating	[22] (fire resistance, full-scale RC slabs)
– slabs 250 mm x 110 mm x 1100 mm (width x height x exposed span); – straight or 90 degrees bent bars in the lap area; – 8 mm or 12 mm glass FRP bars	– continuation of [22] research programme extended for tension lap splices analysis – fire resistance test	– beams with straight-ended overlapped bars failed in 19 – 39 min, while providing 90 degrees curvature resulted in an increase of the failure time to 75 minutes	[23] (fire resistance, full-scale RC slab)

Summary of the latest research on internally FRP-reinforced concrete elements at/after high-temperature exposure – continued from page 195

Podsumowanie najnowszych badań dotyczących elementów betonowych z wewnętrznym zbrojeniem z FRP w czasie/po ekspozycji na wysoką temperaturę – cd. ze str. 195

Analysed elements 1	Test procedure/methods 2	Main findings 3	Ref. 4
– finishing type of the bar analysed (sand-coating and sand-coating with two fibre helices wound on rebar); – 1200 mm x 200 mm x 3900 mm (reinforced with 16 mm GFRP bars spaced by 100 mm);	– fire resistance tests; – 55% of the overall capacity of slabs at ambient temperature, which was higher than the service load expected to occur in a real situation (based on serviceability design criteria)	– two slabs with 60 mm concrete cover (suggested by CSA S806 [24] to provide 2 hours of fire resistance) were submitted to standard fire tests according to ASTM E119 [12] and sustained over 3 hours; – the design guidelines given in [24] appeared to be rather conservative; – although the loss of bond between bars and concrete in material tests occurred at a temperature close to the glass transition temperature, in the element's test 200 mm length of anchorage zone in an unexposed-to-heat area appeared to be effective in anchoring the bars; – although all of the resin got burnt, none of the bars inside the slab failed in a rupture mode; – numerical modelling appeared to be effective in predicting temperature distributions in cross-sections and could be used to assess loss of FRP strength	[19] (fire resistance, full-scale RC slab)
– the high-performance concrete slabs prestressed with CFRP tendons; – three specimens with dimensions 200 x 450 x 3360 mm and two specimens 200 x 600 x 3360 mm were tested simultaneously – 6 mm CFRP tendons	– midspan vertical displacement and CFRP draw-in were controlled during the fire exposure; – the thermocouples were placed throughout the section's height in the middle of the span, along the support area (at unheated length) and close to the support	– significant differences in through-thickness temperature distributions for identical specimens observed; – identical specimens Slab #2 and Slab #1 failed in various modes (concrete spalling and loss of anchorage, respectively) at the different duration of the fire exposure (12 and 42 minutes) – slabs varying with the dosage of PP fibres (added to concrete to avoid spalling), the addition of 2 kg/m³ 3 mm long fibres appeared to be significantly less effective in concrete spalling prevention than the addition of 1.2 kg/m³ 6 mm long fibres; – the available European standard for concrete in fire [25] suggests a dosage of 2 kg/m³ PP fibres to avoid spalling (without any information on desirable fibre length), which seems to be contradictory to the presented results; – the presence of CFRP grids within the anchorage zones led to the postponement of the failure process in slabs, for which failure occurred by loss of anchorage; – loss of anchorage started, when the temperature at the lower edge of CFRP in the midspan was about 310°, regardless of the temperature at the unheated, anchorage zone; – reasons for such a phenomenon are not clear, however, authors suggested that it could be related to processes of longitudinal thermal conduction and/or thermal expansion of the FRP	[26] (fire resistance, full-scale RC slabs)
– unheated and post-heated beams; – 130 mm x 180 mm x 1200 mm beams with 2 x 6 mm bars at the top and 2 x 10 mm bars at the bottom	– beams analysed experimentally and theoretically (with and without taking into account the bar slippage effect); – the heating process lasted 4 hours and the maximum value of temperature was close to 500°C	– beams with BFRP bars demonstrated the highest reduction of initial stiffness due to cracking, followed by specimens with GFRP, CFRP and steel reinforcement; – the ultimate load value of control and post-heated specimens calculated using ACI standard [27] without taking into account slippage of the bars were overestimated in comparison to measured values; – however, the method, which included the influence of FRP-concrete slippage instead of perfect bond assumption, met experimental results with reasonable accuracy	[28] (post heat, reduced scale RC beams)
– mounting steel caps at the ends of FRP bars with the use of high temperature-resistant epoxy adhesive; – the caps were covered with thermal insulation; – 130 mm x 180 mm x 1200 mm; – 2 x 6 mm bars at the top and 2 x 10 mm bars at the bottom	– FRP-reinforced beams after exposure to high temperatures (up to 500°C)	– applying steel caps at the ends of FRP reinforcement increased the following parameters in tested beams: load-carrying capacity, cracking load, stiffness and total absorbed energy; – however, it resulted in a ductility decrease; – the positive influence of the caps was more evident in the case of previously heated specimens than in the case of those undamaged	[29] (after heat, reduced scale RC beams)
– GFRP reinforced beams prepared with the use of steel fibre-reinforced high-strength concrete; – 150 mm x 150 mm x 1260 mm; – 2 x 8 steel reinforcement bars at the top and 2 x 6 or 8 mm GFRP bars at the bottom	– subjected to heat exposure up to 600°C (stable temperature sustained for 1 hour) and then loaded till failure; – as far as failure load was determined, the processes of cracking propagation and strain development have been analysed as well; – the variables changed within the experiment were fibre volume, reinforcement ratio and applied temperature	– the maximum load value was slightly reduced at 250°C, notably improved at 400°C and significantly decreased severe degradation at 600°C; – a similar trend was observed when analysing the deformability of the element – the influence of temperature was positive up to 400°C	[30] (after heat, reduced scale RC beams)

Summary of the latest research on internally FRP-reinforced concrete elements at/after high-temperature exposure – continued from page 196

Podsumowanie najnowszych badań dotyczących elementów betonowych z wewnętrznym zbrojeniem z FRP w czasie/po ekspozycji na wysoką temperaturę – cd. ze str. 196

Analysed elements 1	Test procedure/methods 2	Main findings 3	Ref. 4
– the new arrangement of reinforcement tension bars (Fig. 1) – overlapping areas analysed; – 150 mm x 160 mm x 1610 mm beams – 2 x 6 mm steel reinforcement bars at the top (none in the midspan) and 2 x (5 mm x 5 mm) CFRP at the bottom	– submitted to flexural tests at ambient temperature and under fire exposure;	– at ambient temperature specimens with the loops failed at lower load values due to the shear of the concrete at the overlapping area; – the sustained load capacity at elevated temperature in comparison to straight reinforcement bars was observed previously in push-off bond tests [31] but was prevented by the shear process in overlapping areas in fire performance tests (similar to ambient temperature tests)	[32] (fire resistance, reduced scale RC beams)
– various types of FRP: basalt FRP, hybrid basalt-carbon FRP and nano-hybrid FRP; – beams 140 mm x 260 mm x 3200 mm	– beams loaded to the half of their ultimate strength capacity, then unloaded, heated, naturally cooled down and tested till flexural failure	– both HFRP and nHFRP revealed atypical behaviour, which was a decrease in deflection after gaining a certain value of temperature in the heating phase; – the phenomenon might be related to the thermal expansion coefficient of the carbon fibres; – the force-deflection behaviour of both post-heated and unheated beams was similar; – however, the reduction of the maximum load value was notable (a reduction of up to 43% when compared to specimens submitted to ambient temperature only); – moreover, the mode of failure changed from compression damage for unheated specimens to tension zone damage in post-heated specimens; – the above-stated might be related to loss of strength in FRP reinforcement due to previous heating	[33, 34] (post-heat, full scale RC beams)
– 2 x 10 mm CFRP or 2 x 12 mm GCFRP bars in tension zone of the beam; – 150 mm x 200 mm x 1800 mm	– after heating up to 600°C; – four-point bending tests performed	– significant increase in the ultimate capacity, deflections and crack width after heat exposure (e.g. about 40% after 2 hours of 400°C exposure in terms of crack width and 100 % and 22% in terms of deflections – GFRP and CFRP respectively, same exposure); – high accuracy of a proposed numerical model (differences up to 10% when maximum crack width, stiffness and residual bearing capacity are analysed)	[35] (post heat, reduced scale RC beams)
– 140 mm x 260 mm x 3200 mm beams with 2 x 8 mm steel reinforcement bars at the top (none in the middle span) and 2 x 14 mm BFRP, HFRP or nHFRP bars at the bottom; – BFRP: Basalt FRP; HFRP: hybrid carbon-basalt FRP; nHFRP: hybrid carbon-basalt FRP with nano-modification of the matrix	– continuation of the research project [33] expanded by behaviour analysis of FRP reinforced beams submitted to simultaneous thermo-mechanical load; – beams submitted to 50% of ambient temperature bearing load and then heated according to ISO 834 [21] standard fire definition	– BFRP-RC beams appeared to have higher fire resistance (approximately 100 min); – failure modes were also different for BFRP and HFRP/nHFRP reinforced beams, which were a tensile rupture and concrete crushing respectively; – as to beams with hybrid reinforcement it was also noted after the removal of the concrete cover that the resin of FRP bars evaporated during tests	[36] (fire resistance, full-scale RC beams)
– 200 mm x 300 mm x 2700 mm with steel and GFRP bars (2 x 12 mm steel in compression and 2 x 16-22 steel and 8-20 mm GFRP in tension)	– a simplified method for analysing the behaviour of hybrid and steel RC beams under thermo-mechanical load (both: steady and transient state) proposed; the analytical data was compared to the available results – load ratios in experiments [37]: 0.32-0.51	– good agreement to experimental results was achieved; – validation with the use of experimental data also appeared to be useful in predicting the failure mode of the element; – the proposed model, relying on the strain compatibility and forces equilibrium of the beam section, might be a good alternative to more human resources and time consumptive numerical analyses	[38] (during heating, full-scale RC beams)
- Half-scale column height 1 m - Cross sections from 350 mm x 350 mm to 450 mm x 450 mm	temperature measurements during heating compared with FEM results; post-heating materials properties tests	good accuracy of theoretically derived model in terms of temperature prediction	[39] (post heating, reduced-scale RC columns)
- Column 3.7 m in height and 300 mm in diameter BFRP reinforcement – 12 mm in diameter	fire resistance test and FEM analysis	– fire resistance of above 3h	(fire resistance, full-scale RC columns) [40]

Discussion

Fibre Reinforced Polymer (FRP) is a light, high-strength and durable material. Its electric indifference, high corrosion resistance, high tensile strength, good damage tolerance, good fatigue performance, and low energy consumption during the fabrication of raw materials should also be emphasised, as these are benefits that enable multiple potential applications in various industries.

FRP reinforcement bars are considered a good alternative to steel reinforcement, mainly because of their high tensile strength and corrosive resistance. Nevertheless, the problems with serviceability (extended cracks and deflections) and poor performance at elevated and high temperatures of such structures still limit their application possibilities within the concrete industry. Such problems result from the main disadvantages of the bars: low modulus of elasticity and high reduction in mechanical properties even at slightly elevated temperatures. In addition, reducing the compressive strength (when compared to the tensile strength value) might be challenging [40 – 42].

Various types of additives can be added to the matrix to limit the negative influence of temperature on FRP bars. In addition, the presence of concrete cover, which limits oxygen ingress, is supposed to prevent bars from burning and increase their strength at high temperatures. However, this assumption may only be true before the appearance of concrete cracks. The mechanical performance of the bar, as well as its interaction with concrete at high temperatures, is a challenge when considering fire situations. In this regard, two aspects are especially important:

- potential cracks resulting from differences between the thermal expansion of concrete and bar;
- reduction in bond stresses along the anchor length (necessity of increasing the anchor length of the bar).

The literature review confirmed that there is a lack of knowledge concerning the incorporation of FRPs and concrete elements under compression and fire conditions. With the few aforementioned exceptions, the normative and experimental investigations concern mostly bent elements (slabs and beams).

Most analyses for all types of reinforcement systems (including internal, EB, and NSM systems) pertain to carbon-type FRPs and epoxy adhesives. Although a large experimental database is already available, enabling good calibration of numerical models and the use of novel methods of analysis (e.g. artificial neural networks), the data are still considered insufficient. Further experimental investigations should be extended to other types of materials, such as FRPs with bio-based fibres [43] or modified matrix FRPs). Moreover, experimental investigations on various configurations of overlapping areas and bar shapes are essential. In addition, other test stand configurations are recommended, as in most cases, four-point bending tests are performed. Shear – or compressive-dominant schemes should be considered along with fatigue performance analyses.

Several guides, including normative documents [44 – 51], consider the safe design of concrete elements with FRP

Dyskusja

Polimer wzmocniony włóknem (ang. FRP) jest lekkim, wytrzymałym i trwałym materiałem. Należy również podkreślić jego obojętność elektryczną, wysoką odporność na korozję, wysoką wytrzymałość na rozciąganie, dobrą tolerancję na uszkodzenia, wysoką wydajność zmęzeniową i niskie zużycie energii podczas wytwarzania, ponieważ są to korzyści, które umożliwiają wiele potencjalnych zastosowań w różnych gałęziach przemysłu.

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 problemy z użytkowalnością (intensywniejsze zarysowanie i ugięcia) oraz słaba wydajność tego typu konstrukcji w podwyższonych i wysokich temperaturach nadal ograniczają ich możliwości zastosowania w konstrukcjach betonowych. Takie problemy wynikają z głównych wad prętów: niskiego modułu sprężystości i dużego obniżenia właściwości mechanicznych nawet przy nieznacznie podwyższonych temperaturach. Ponadto zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie (w porównaniu z wartością wytrzymałości na rozciąganie) może również stanowić wyzwanie [40 – 42].

Do polimerowej matrycy prętów można dodawać różnego rodzaju dodatki, aby ograniczyć negatywny wpływ temperatury na pręty FRP. Dodatkowo obecność otuliny betonowej, która ogranicza przenikanie tlenu, ma zapobiegać paleniu się prętów i zwiększać ich wytrzymałość w wysokich temperaturach. Jednak to założenie może być prawdziwe tylko przed pojawieniem się zarysowania betonu. Parametry mechaniczne pręta, a także jego interakcja z betonem w wysokich temperaturach, stanowią wyzwanie przy rozpatrywaniu sytuacji pożarowych. W związku z tym szczególnie ważne są dwa aspekty:

- potencjalne zarysowania wynikające z różnic między rozszerzalnością cieplną betonu a prętem;
- zmniejszenie naprężeń przyczepności na długości zakotwienia (konieczność zwiększenia długości zakotwienia).

Przegląd literatury potwierdził, że brakuje wiedzy na temat stosowania elementów betonowych z FRP w warunkach ściskania i pożaru. Poza nielicznymi wyjątkami rozważania normatywne i doświadczalne dotyczą głównie elementów zginanych (płyty i belek).

Większość analiz dla wszystkich typów systemów zbrojenowych (w tym zbrojenia wewnętrznego, EB i NSM) dotyczy węglowych FRP i matryc epoksydowych. Chociaż dostępna jest już obszerna eksperymentalna baza danych, umożliwiająca dobrą kalibrację modeli numerycznych i stosowanie nowatorskich metod analizy (np. sztucznych sieci neuronowych), dane są nadal uważane za niewystarczające. Dalsze badania powinny zostać rozszerzone na inne rodzaje materiałów, takie jak FRP z włóknami pochodzenia biologicznego [43] lub FRP o zmodyfikowanej matrycy. Ponadto niezbędne są eksperymenty dotyczące różnych konfiguracji zakotwień i kształtów prętów. Zalecane są też inne konfiguracje stanowisk testowych, ponieważ w większości przypadków wykonywane są czteropunktowe próby zginania. Należy rozważyć schematy z dominacją ścinania lub ściskania wraz z analizami wytrzymałości zmęczeniowej.

W przypadku kilku dostępnych wytycznych projektowania, w tym w dokumentach normatywnych [44 – 51], rozważa się bezpieczne wymiarowanie elementów betonowych ze zbroje-

reinforcement. Issues related to fire resistance remain one of the biggest challenges to be overcome. Safety in the case of fire is a basic requirement for building construction according to Regulation No. 305/2011 of the European Parliament and Council [52].

To draw proper application areas for FRP internal reinforcement of concrete structural elements, clear recommendations for the assessment of their fire resistance, toxicity, and smoke generation should be evaluated and justified. As already mentioned in the literature, a few methods of fire performance assessment confirmed high levels of accuracy, some can be approved for design purposes [53, 54], but only under clearly underlined assumptions (e.g. necessity of confirmation of the similar mechanical parameters for materials).

Concluding remarks

Design guidelines for typical steel internal reinforcement are complex and address many aspects, such as the shape of the bar or overlapping areas. These guidelines are based on many years of investigation and observation of real-scale elements. Not all of them should be thoughtlessly „mirrored” to assess the performance of FRP bars. In this case, experimental investigations of various configurations of overlapping areas and bar shapes are essential. Moreover, other configurations of the test stand are recommended in addition to the four-point bending tests which are performed in most cases. Shear or compressive-dominant schemes should be considered, along with fatigue performance analyses.

As an alternative to internal steel bars, FRP reinforcement bars have been included in the latest release of the European standard for the design of concrete structures. However, fire safety aspects have not been widely discussed in the current version of this document. The potential use of such bars might be possible only when there is no demand in terms of the fire resistance class, which significantly limits potential application areas.

In addition, in most numerical and experimental investigations, the ISO-834 curve is used for temperature-time dependency determination, whereas in real fire situations, such a curve may be significantly different, depending on many variables (e.g. type of used materials or presence of fire sprinkler systems). A more performance-based approach can be suggested, including analyses of various fire scenarios adjusted for particular types of buildings (e.g. with Computational Fluid Dynamics analyses in fire included).

When FRP is an internal reinforcement, the concrete cover plays a significant role in the protection of the bars from excessive heating and prevention of burning, as long as oxygen ingress is limited. However, the cracking process (owing to both thermal and mechanical loading) can lead to the creation of exposed, weaker zones of the bars, increasing deformations of the element and reducing its capacity.

Using thermal insulation in anchorage zones has already proven to be effective in terms of postponing the process of

niem FRP. Kwestie związane z odpornością ogniową pozostają jednym z największych wyzwań, z którymi trzeba się zmierzyć. Bezpieczeństwo w przypadku pożaru jest podstawowym wymogiem dla budownictwa zgodnie z Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady nr 305/2011 [52].

Aby nakreślić właściwe obszary zastosowania zbrojenia wewnętrznego FRP betonowych elementów konstrukcyjnych, należy ustalić jasne zalecenia dotyczące oceny ich odporności ogniowej, toksyczności i wytwarzania dymu. Jak już wspomniano w literaturze, istnieje kilka metod oceny odporności ogniowej o potwierdzonym wysokim poziomie dokładności, niektóre mogą być zatwierdzone do celów projektowych [53, 54], ale tylko przy wyraźnie podkreślonych założeniach (np. konieczność potwierdzenia podobnych parametrów mechanicznych dla materiałów).

Podsumowanie

Wytyczne projektowe dla typowego stalowego zbrojenia wewnętrznego są złożone i dotyczą wielu aspektów, takich jak kształt pręta lub strefy zakotwień prętów. Wytyczne te opierają się na wieloletnich badaniach i obserwacjach elementów w skali rzeczywistej. Nie wszystkie z nich powinny być „lustrzanie” przekopowane bez większego zastanowienia w celu oceny wydajności prętów FRP. Niezbędne są badania eksperymentalne różnych konfiguracji stref zakotwień i kształtów prętów. Ponadto oprócz czteropunktowych prób zginania, które są wykonywane w większości przypadków, zalecane są inne konfiguracje stanowiska testowego. Należy rozważyć schematy z dominacją ścinania lub ściskania, wraz z analizami wytrzymałości zmęczeniowej.

Jako alternatywa dla wewnętrznych prętów stalowych, pręty zbrojeniowe FRP zostały włączone do kolejnej wersji europejskiej normy dotyczącej wymiarowania konstrukcji betonowych. Aspekty bezpieczeństwa pożarowego nie zostały jednak szeroko omówione w obecnej wersji tego dokumentu. Potencjalne zastosowanie takich prętów może być możliwe tylko wtedy, gdy nie ma zapotrzebowania na klasę odporności ogniowej, co znacznie ogranicza potencjalne obszary zastosowań.

Ponadto w większości badań numerycznych i eksperymentalnych krzywa ISO-834 jest wykorzystywana do wyznaczania zależności temperaturowo-czasowej, podczas gdy w rzeczywistych sytuacjach pożarowych taka krzywa może się znacznie różnić, w zależności od wielu zmiennych (np. rodzaju użytych materiałów lub obecności przeciwpożarowych instalacji tryskaczowych). Można zaproponować podejście w większym stopniu oparte na wydajności, w tym analizy różnych scenariuszy pożarowych dostosowanych do poszczególnych typów budynków (np. z uwzględnieniem analiz obliczeniowej dynamiki płynów w przypadku pożaru).

Gdy FRP stanowi zbrojenie wewnętrzne, otulina betonowa odgrywa znaczącą rolę w ochronie prętów przed nadmiernym nagrzewaniem i zapobieganiu przed spalaniem się pręta, o ile ograniczone jest wnikanie tlenu. Jednak proces zarysowania betonu (ze względu na obciążenie zarówno termiczne, jak i mechaniczne) może prowadzić do powstawania odsłoniętych, słabszych stref prętów, zwiększając odkształcenia elementu i zmniejszając jego nośność.

capacity loss due to heating, which is similar to the trends observed for EB and NSM strengthening systems. Further tests on various types of insulation materials and locations can reveal the practical importance of these investigations.

Finishing the bar as far as the material type has a great impact on bond performance at elevated temperatures and, as a result, fire performance, so long as new material solutions have been preliminarily analysed within the constituent material tests, full-scale structural elements' tests could confirm the applicability of these solutions in real elements. It is also worth mentioning that the available experimental data in terms of the performance of full-scale elements with FRP internal reinforcement under fire exposure are still very limited.

Various numerical models have been developed with good resemblance to experimental data; however, owing to the complexity of the analysed issues, further experimental tests are recommended, especially for full-scale experiments.

Finally, before determining the final application areas, clear recommendations for the assessment of fire resistance, toxicity, and smoke generation should be introduced to the available standards.

Received: 10.02.2025

Revised: 04.04.2025

Published: 23.07.2025

Wykazano skuteczność stosowania dodatkowej izolacji termicznej w strefach zakotwienia w celu opóźnienia procesu utraty nośności na skutek ogrzewania, podobnie do trendów obserwowanych w przypadku systemów wzmacniających EB i NSM. Dalsze badania na różnych rodzajach materiałów izolacyjnych i lokalizacjach mogą ujawnić praktyczne znaczenie tych badań.

Sposób wykończenie pręta pod kątem wykorzystanego rodzaju materiału ma duży wpływ na wydajność przyczepności w podwyższonych temperaturach, a w rezultacie na odporność ogniową elementu. O ile nowe rozwiązania materiałowe zostały wstępnie przeanalizowane w ramach testów materiałów składowych, pełnowymiarowe testy elementów konstrukcyjnych mogą potwierdzić możliwość zastosowania tych rozwiązań w rzeczywistych elementach. Warto również wspomnieć, że dostępne dane doświadczalne w zakresie pełnowymiarowych elementów ze zbrojeniem wewnętrznym FRP w warunkach ekspozycji ogniowej są nadal bardzo ograniczone.

Opracowano różne modele numeryczne z dobrym podobieństwem do danych eksperymentalnych; Jednak ze względu na złożoność analizowanych zagadnień zaleca się dalsze badania eksperymentalne, zwłaszcza w przypadku eksperymentów w pełnej skali.

Podsumowując, przed określeniem ostatecznych obszarów zastosowań, do dostępnych norm należy wprowadzić jasne zalecenia dotyczące oceny odporności ogniowej, toksyczności pożarowej i wytwarzania dymu.

Artykuł wpłynął do redakcji: 10.02.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 04.04.2025 r.

Opublikowano: 23.07.2025 r.

Literature

- [1] Lau D, Qiu Q, Zhou A, Chow CL. Long term performance and fire safety aspect of FRP composites used in building structures. *Constr. Build. Mater.* 2016; vol. 126, pp. 573 – 585. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.031.
- [2] Brózda K, Selejda J. Analysis of FRP bars used as reinforcement in concrete structure. *Prod. Eng. Arch.* 2016; vol. 12, no. 3, pp. 2 – 4. DOI: 10.30657/pea.2016.12.01.
- [3] Duflou JR, Deng Y, Van Acker K, Dewulf W. Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment-based study. *MRS Bull.* 2012; vol. 37, no. 4, pp. 374 – 382. DOI: 10.1557/mrs.2012.33.
- [4] Czarnecki L, Kaproń M, Van Gemert D. Sustainable construction: Challenges, contribution of polymers, research arena. 2nd Int. Conf. Sustain. Constr. Mater. Technol. 2015, pp. 147 – 157, 2010. DOI: 10.1515/rbm-2013-6583.
- [5] El-Salasakawy E, Kassem C, Benmokrane B. Field application of FRP composite bars as reinforcement for bridge decks, in 4th Structural Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, 2002, pp. 1–10.
- [6] Li Z, Ma J, Ma H, Xu X. Properties and applications of basalt fiber and its composites. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2018; vol. 186, no. 2. DOI: 10.1088/1755-1315/186/2/012052.
- [7] Kim YJ. Advanced composites in bridge construction and repair. Woodhead Publishing. 2014.
- [8] Kosiór-Kazberuk M. Application of basalt-FRP bars for reinforcing geotechnical concrete structures. *MATEC Web Conf. – GCCETS2018.* 2019; vol. 265, p. 05011. DOI: 10.1051/mateconf/201926505011.
- [9] Elgabbas B, Ahmed F, Benmokrane E. Basalt FRP reinforcing bars for concrete structures. *Proc. 4th Asia-Pacific Conf. FRP Struct. APFIS 2013.* vol. 440, no. December, pp. 11–13, 2013.
- [10] 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; vol. 22, no. 4, pp. 500 – 513. DOI: 10.2749/101686612X13363929517613.
- [11] Hawileh RA, Naser MZ. Thermal-stress analysis of RC beams reinforced with GFRP bars. *Compos. Part B Eng. Compos.* 2012; vol. 43, no. 5, pp. 2135–2142. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.03.004.
- [12] ASTM Test Method E119. Standard test methods for fire tests of building construction and materials. West Conshohocken: American Society for testing and materials, 2002.
- [13] ASTM Test Method. E1529 Standard test methods for determining effects of large hydrocarbon pool fires on structural members and assemblies. West Conshohocken: American Society for testing and materials, 1993.
- [14] Fehérvári S. Characteristics of tunnel fires. *Concr. Struct.* 2008; vol. 9, pp. 56 – 60.
- [15] Hawileh RA, Rasheed HA. Thermal analysis of GFRP-reinforced continuous concrete decks subjected to top fire. *Int. J. Adv. Struct. Eng.* 2017; vol. 9, no. 4, pp. 315 – 323. DOI: 10.1007/s40091-017-0168-7.
- [16] Schmitt A, Carvelli V, Pahn M. Thermo-mechanical loading of GFRP reinforced thin concrete panels. *Compos. Part B Eng.* 2015; vol. 81, pp. 35 – 43. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.06.020.
- [17] Mohammad SH, Gülşan ME, Çevik A. Behaviour of Geopolymer Concrete Two-Way Slabs Reinforced by FRP Bars After Exposure to Elevated Temperatures. *Arab. J. Sci. Eng.* 2022; vol. 47, no. 10, pp. 12399 – 12421. DOI: 10.1007/s13369-021-06411-y.
- [18] Nigro E, Cefarelli G, Bilotta A, Manfredi G, E. Cosenza E. Fire resistance of concrete slabs reinforced with FRP bars. Part I: Experimental investigations on the mechanical behavior. *Compos. Part B Eng.* 2011; vol. 42, no. 6, pp. 1739–1750. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.02.025.
- [19] Hajiloo H, Green MF, Noël M, Bénichou N, Sultan M. Fire tests on full-scale FRP reinforced concrete slab. *Compos. Struct.* 2017; vol. 179, pp. 705–719. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.07.060.

- [20] Hajiloo H, Green MF. GFRP reinforced concrete slabs in fire: Finite element modelling. *Eng. Struct.* 2019; vol. 183. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.028.
- [21] ISO 834-1:1999 Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements.
- [22] Rosa IC, Santos P, Firmo JP, Correia JR. Fire behaviour of concrete slab strips reinforced with sand-coated GFRP bar. *Compos. Struct.* 2020; vol. 244, no. December 2019, p. 112270, 2020. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112270.
- [23] Rosa IC, Firmo JP, Correia JR. Fire behaviour of GFRP-reinforced concrete slab strips. Effect of straight and 90° bent tension lap splices. *Eng. Struct.* 2022; vol. 270, no. July. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114904.
- [24] Design and construction of building components with fiber-reinforced polymers. CSA-S806., Mississauga, ON, Canada: CSA (Canadian Standards Association), 2012.
- [25] CEN Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Parts 1 – 2: General Rules – Structural Fire Design (EN 1992-1-2). Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [26] Maluk C, Pietro Terrasi G, Bisby L, Stutz A, E. Hugi E. Fire resistance tests on thin CFRP prestressed concrete slab. *Constr. Build. Mater.* 2015; vol. 101, no. Part 1, pp. 558 – 571. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.031.
- [27] ACI 440.1R-15, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. American Concrete Institute, 2015.
- [28] Hamad RJA, Megat Johari MA, Haddad RH. Effects of bars slippage on the pre-and post-heating flexural behavior of FRP reinforced concrete beams: Experimental and theoretical investigations. *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 2019; vol. 10, no. 2, pp. 574 – 602.
- [29] Hamad RJA, Haddad RH, Megat Johari MA. New anchorage system of bars to improve the mechanical performance of post-heated FRP-reinforced concrete beams. *Constr. Build. Mater.* 2019; vol. 229, p. 117090. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117090.
- [30] Jafarzadeh H, Nematzadeh M. Evaluation of post-heating flexural behavior of steel fiber-reinforced high-strength concrete beams reinforced with FRP bars: Experimental and analytical results. *Eng. Struct.* 2020; vol. 225, p. 111292. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111292.
- [31] Kiari M, Triantafyllidou E, Grosu S, Stratford T, Bisby L. Design of an FRP-Reinforced Concrete Beam System for Fire Performance, in *Advanced Composites in Construction*, Belfast, UK, 2013.
- [32] Kiari M, Stratford T, Bisby LA. New design of beam FRP reinforcement for fire performance, in *Fifth International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading*, At East Lansing, MI, USA, 2015.
- [33] Protchenko K, Szmigiera E. Post-fire characteristics of concrete beams reinforced with hybrid FRP bar. *Materials (Basel)*. 2020; vol. 13, no. 5. DOI: 10.3390/ma13051248.
- [34] Protchenko K. Residual Fire Resistance Testing of Basalt-and Hybrid-FRP Reinforced Concrete Beams. *Materials (Basel)*. 2022; vol. 15, no. 4. DOI: 10.3390/ma15041509.
- [35] Zhao J, Pan H, Wang Z, Li G. Experimental and Theoretical Study on Flexural Behavior of GFRP- and CFRP-Reinforced Concrete Beams after High-Temperature Exposure. *Polymers (Basel)*. 2022; vol. 14, no. 19. DOI: 10.3390/polym14194002.
- [36] Protchenko K, Szmigiera E, Urbański M, Garbacz A. Mechanical performance of FRP-RC flexural members subjected to fire conditions. *Bud. i Arch.* 2020; vol. 19, no. 4, pp. 017–030. DOI: 10.35784/bud-arch.2119.
- [37] Tian J, Zhu P, Qu W. Study on fire resistance time of hybrid reinforced concrete beam. *Struct. Concr.* 2019; vol. 20, no. 6, pp. 1941 – 1954. DOI: 10.1002/suco.201800320.
- [38] Al-Thairy H. A simplified method for steady state and transient state thermal analysis of hybrid steel and FRP RC beams at fire. *Case Stud. Constr. Mater.* 2020; vol. 13, p. e00465. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00465.
- [39] Almerich-Chulia A, Martín-Concepción P, Moreno-Puchalt J, Molines-Cano JM. Analytical and Experimental Behaviour of GFRP-Reinforced Concrete Columns under Fire Loading. *J. Compos. Sci.* 2024; vol. 8, no. 5. DOI: 10.3390/jcs8050187.
- [40] Wydra M, Turkowski P, Dolny P, Sadowski G, Grochowska N, Michalski PP, Wiecek-Czarnocka M, Pakielna Z, Fangrat J. Basalt fibre reinforced polymer bars as main reinforcement of axially compressed concrete column – experimental and numerical considerations of fire resistance. *Fire Saf. J.* 2023; vol. 140, no. June. DOI: 10.1016/j.firesaf.2023.103898.
- [41] Wydra M, Sadowski G, Dolny P, Turkowski P, Fangrat J. The performance of concrete cover as a thermal insulation for BFRP bars in tension at early stage of fire. *Mater. Bud.* 2025; vol. 633, no. 5. DOI: 10.15199/33.2025.05.02.
- [42] Wydra M. PhD thesis: Fire resistance of concrete columns reinforced with BFRP bars. 2023.
- [43] Kodur V, Venkatachari S, Bhatt P, Matsagar VA, Singh SB. Fire Resistance Evaluation of Concrete Beams and Slabs Incorporating Natural Fiber-Reinforced Polymers. *Polymers (Basel)*. 2023; vol. 15, no. 3. DOI: 10.3390/polym15030755.
- [44] CSA-S806-02 Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers. Ontario: Canadian Standards Association. 2002.
- [45] CAN/CSA-S6-06 Canadian highway bridge design code. Ontario: Canadian Standards Association. 2006.
- [46] ACI 440.1R-06 Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. ACI Committee 440, American Concrete Institute (ACI), 2006.
- [47] JSCE Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials. Tokyo: Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Japan Society of Civil Engineers, 1997.
- [48] CNR-DT 203/2006 Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars. Rome: National Research Council, 2006.
- [49] 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.
- [50] 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
- [51] EN 1992-1-1:2023 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2023.
- [52] Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC Text with EEA relevance,” no. 305, pp. 5–43, 2011.
- [53] Terms RT, Kodur VKR, Cheng FP, Wang TC, Sultan MA. NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC Guidelines for fire resistance design of high-strength concrete columns. *J. Struct. Eng.* 2022; vol. 129, pp. 253 – 259, 2005.
- [54] Nigro E, Cefarelli G, Bilotta A, G. Manfredi AG, Cosenza E. Guidelines for flexural resistance of FRP reinforced concrete slabs and beams in fire. *Compos. Part B Eng.* 2014; vol. 58, pp. 103 – 112. DOI:10.1016/j.compositesb.2013.10.007.