

dr inż. Małgorzata Wydra^{1*)}

ORCID: 0000-0002-4629-9656

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

ORCID: 0000-0002-7871-0032

Overview of fire research on concrete structural elements strengthened with fiber-reinforced polymer composites

Przegląd badań ogniowych betonowych elementów konstrukcyjnych wzmocnianych kompozytami z polimerów zbrojonych włóknami

DOI: 10.15199/33.2025.12.09

Abstract. Investigations on Fibre Reinforced Polymers (FRPs) at ambient temperature have already proven their effectiveness for strengthening concrete structural elements because of their high mechanical strength and durability. However, their performance at elevated and high temperatures requires proper understanding to enable safe design methods, as the FRPs and adhesives used to mount them are highly vulnerable to even 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 on Externally Bonded or Near Surface Mounted FRP-strengthened concrete structural elements and 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; construction elements; fibre reinforced polymer reinforcement; fire conditions; critical review.

Streszczenie. Badania nad polimerami wzmocnionymi włóknami FRP (ang. *Fiber Reinforced Polymer*) w temperaturze otoczenia dowiodły ich skuteczności we wzmocnianiu elementów konstrukcyjnych ze względu na wysoką wytrzymałość i trwałość. Zachowanie ich w podwyższonej i wysokiej temperaturze wymaga jednak dodatkowej analizy w celu zapewnienia prawidłowych metod projektowania, ponieważ FRP i kleje używane do ich montażu są bardzo podatne na nawet nieznacznie podwyższoną temperaturę. Ponadto analizy wymagają kwestie związane z przewodnością cieplną i palnością. Celem artykułu jest przedstawienie aktualnego stanu wiedzy na temat badań wykonanych w pełnej lub zredukowanej skali geometrycznej, których przedmiotem są betonowe elementy konstrukcyjne, wzmocniane FRP zewnętrznie lub przypowierzchniowo oraz wnioski dotyczące kierunków dalszych badań. Przeanalizowano wyniki testów elementów po ogrzewaniu oraz poddanych jednoczesnemu obciążeniu mechanicznemu i termicznemu w stanach nieustalonym i ustalonym.

Słowa kluczowe: beton; elementy konstrukcyjne; zbrojenie z polimeru wzmocnionego włóknem; podwyższona temperatura; przegląd badań.

For the past 50 years, many strengthening or repair possibilities have been revealed owing to the advantageous properties of FRP (*Fibre Reinforced Polymer*) composites [1 ÷ 4], such as the retrofitting of masonry walls, seismic retrofitting of buildings and bridges, repair and strengthening of concrete, metallic and timber structural elements, and rehabilitation of such constructions as chimneys, historic monuments, or off-shore platforms [5]. It is possible owing to the beneficial properties of FRPs, such as their low weight-to-strength ratio, electromagnetic indifference, and extensive corrosion resistance [3 ÷ 8].

FRPs are the most commonly used external reinforcements in the concrete construction industry. The composite can

Przez ostatnie 50 lat, dzięki korzystnym właściwościom kompozytów FRP (ang. *Fibre Reinforced Polymer*) [1 ÷ 4], opracowano wiele metod wzmocnienia lub naprawy, obejmujących modernizację ścian murowanych, modernizację sejsmiczną budynków i mostów, naprawę i wzmocnianie konstrukcyjnych elementów betonowych, metalowych i drewnianych oraz renowację takich konstrukcji, jak kominy, budowle zabytkowe lub platformy przybrzeżne [5]. Jest to możliwe dzięki korzystnym właściwościom FRP, do których zaliczamy mały stosunek masy do wytrzymałości, obojętność elektromagnetyczną i dużą odporność na korozję [3 ÷ 8].

FRP jest najczęściej stosowanym typem zbrojenia wewnętrznego w budownictwie betonowym. Kompozyt ten może skutecznie zwiększyć nośność na ściskanie, zginanie i ścinanie lub (rzadko) skręcanie istniejących elementów konstrukcyjnych [5]. Procesy zwiększania nośności można podzielić na dwie grupy:

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii

²⁾ Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Badań Ogniowych

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

effectively increase the bearing capacity of existing structural elements in terms of axial, flexural, shear, or (rarely) torsional strength [5]. Such processes of strength increase can be divided into two groups:

1) strengthening aims to provide a higher bearing capacity of the element to fulfil requirements due to increased loadings or new functionalities (purpose);

2) repairing brings back the load-carrying capacity, ductility, or stability of the deteriorated structure to the level for which it was designed [5].

Strengthening composites can be externally mounted on the surface of an element (e.g., FRP sheets and wraps) or inside previously drilled grooves (e.g. FRP bars or strips). The first type of strengthening system is called “*externally bonded FRP*” (EB FRP), while the second – “*Near Surface Mounted FRP*” (NSM FRP). In both systems, the composite should be mounted with special adhesives such that the stresses from the FRP can be effectively transferred to the hardened concrete element.

Apart from the strengthening of existing or deteriorated elements, the other trend within the concrete structure industry that involves FRPs is replacing steel reinforcement bars with non-metallic bars before casting the structural element [9]. Such an exchange might be considered advantageous in harsh environments, where high corrosive resistance is required. This study focused only on strengthening systems (EB and NSM), while the summary of the investigations concerning concrete structures with internal FRP reinforcement was presented in the study [10].

The intent of this study is to provide a thorough review of the most recent experimental investigations and analytical and numerical considerations of concrete structural elements strengthened with FRP composites at elevated and high temperatures (up to 1200°C), including thermal insulation techniques. Such considerations might be carried out assuming various interactions between static and thermal loads and can be divided into three groups:

1) structural elements are analysed in terms of changes in heat exposure only, so that the temperature distribution inside the element can be set up. Such analysis enables determination of time required to reach the critical temperature in the strengthening system. Critical temperature can be defined in material tests (FRPs and/or adhesives tests).

2) changes in the behaviour of the structural elements can be demonstrated in static tests after heat exposure. Such tests are crucial for assessment of the necessity of repairing or strengthening construction after the fire, as they provide valuable data on the structural safety and serviceability conditions of the construction after heating. Within this trend, there could be mentioned tests, where FRP was part of the structural element during the heat exposure or was used to strengthen the element after heating (not part of the scope in this considerations – e.g. [11 – 14]).

3) tests and simulations of structural elements subjected to simultaneous thermal and static loads have been performed to simulate the real behaviour during a fire situation [15]. Such considerations can be analysed in two states steady (first

1) wzmocnienie w celu spełnienia wymagań odpowiadających zwiększonym obciążeniom lub nowym funkcjom (przeznaczeniu);

2) naprawa przywracająca nośność, ciągliwość lub stateczność zniszczonej konstrukcji do poziomu, do którego została zaprojektowana [5].

Kompozyty wzmacniające można montować zewnętrznie na powierzchni elementu (np. maty i owijki FRP) lub wewnątrz wcześniej wywierconych rowków (np. pręty lub taśmy FRP). Pierwszy rodzaj systemu wzmacniającego nazywa się **zewnętrznie klejonym FRP** (ang. *Externally Bonded FRP* – EB FRP), natomiast drugi – **montowanym przypowierzchniowo FRP** (ang. *Near Surface Mounted* – NSM FRP). W obu systemach kompozyt mocuje się za pomocą specjalnych klejów, aby skutecznie przenosił naprężenia z FRP na stwardniały element betonowy.

Oprócz wzmacniania istniejących lub zniszczonych elementów, innym sposobem wykorzystania FRP w konstrukcjach betonowych jest zastępowanie stalowych prętów zbrojeniowych prętami niemetalicznymi przed zabetonowaniem elementu konstrukcyjnego [9]. Taka wymiana może być uważana za korzystną w trudnych warunkach, gdzie wymagana jest duża odporność na korozję. Przedstawiona analiza dotyczy tylko systemów wzmacniających (EB i NSM), natomiast zestawienie badań dotyczących wpływu temperatury na konstrukcje betonowe z wewnętrznym zbrojeniem FRP przedstawiono w [10].

W artykule przedstawiono przegląd najnowszych badań eksperymentalnych oraz rozważań analitycznych i numerycznych, dotyczących elementów konstrukcyjnych wzmacnianych kompozytami FRP w podwyższonej i wysokiej temperaturze (do 1200°C), z uwzględnieniem technik zabezpieczających termicznie te elementy systemu. Takie rozważania można przeprowadzić przy założeniu różnych interakcji między obciążeniami statycznymi i termicznymi, dzieląc je na trzy grupy:

1) elementy konstrukcyjne analizuje się pod kątem wyłącznie ekspozycji na ciepło, dzięki czemu można ustalić rozkład temperatury wewnątrz elementu. Analiza umożliwia określenie czasu potrzebnego do osiągnięcia krytycznej temperatury elementu w systemie wzmacniającym. Krytyczne wartości temperatury można natomiast wyznaczyć przede wszystkim w testach materiałów (badania FRP i/lub klejów);

2) zmiany w zachowaniu się elementów konstrukcyjnych można wykazać w badaniach statycznych po ekspozycji na działanie ciepła. Są to badania kluczowe w przypadku oceny konieczności naprawy lub wzmocnienia konstrukcji po pożarze, ponieważ dostarczają cennych danych na temat bezpieczeństwa i warunków użyteczności konstrukcji po wygrzaniu. Do tej grupy można zaliczyć: badania, w których system FRP wchodził w skład elementu konstrukcyjnego podczas ekspozycji na ciepło oraz badania, w których był on użyty do wzmocnienia elementu po ogrzewaniu (zagadnienia te, np. [11 – 14], wykraczają poza zakres artykułu);

3) badania i symulacje elementów konstrukcyjnych poddanych jednoczesnym obciążeniom termicznym i statycznym w celu odtworzenia rzeczywistego zachowania się w pożarze [15]. Rozważania te można analizować w stanie ustalonym (najpierw elementy są ogrzewane, a następnie obciążane aż

elements are heated and then loaded until failure) and transient (elements are loaded to part of the bearing load and then heated until failure).

Externally Bonded FRP systems

The fire performance of concrete structural elements strengthened externally by FRP composites has been discussed in a few studies [16 ÷ 21], while the conclusions from more recent studies have been summarized in Table 1. When considering investigations of externally reinforced bent elements without additional insulation, the FRP composite system loses its effectiveness even after a few minutes. Changes in the properties of FRP strengthening system materials occur even at remotely elevated temperatures (corresponding to a glass transition temperature – about 65 – 120°C) [5]. Apart from mechanical properties degradation, a critical process determining the effectiveness of an externally bonded FRP system is the debonding of FRP from concrete. Such debonding occurs mostly because of the softening of the resin used to attach the FRP to the element. Various types of additives to the resin have been investigated in terms of modifying their behaviour under elevated temperatures (e.g. postponing the processes of resin softening) [22 – 31], however, their mechanical properties might decrease in that case. Promising results were observed in the case of use adhesives based on mineral materials or with the use of TRM (*Textile Reinforced Mortar*) systems [32].

The fire performance of a structural element depends significantly on the mechanical and thermal properties of the reinforced concrete element before strengthening. If the strengthening ratio (the proportion of the load-bearing capacity increase caused by the FRP composite related to the capacity of the element before strengthening) is low, it may appear that even after the loss of the FRP system effectiveness, the structural element is still able to bear loads for a long time under fire conditions (even longer than 2 h). The above-mentioned fact is associated with the reduction of loads under fire conditions when compared to extreme design loads; therefore, there is the necessity of proper assessment of loads during a fire at the design stage [20].

Fire insulation materials can be applied to postpone the FRP debonding process. Various insulation materials can be used to increase fire endurance in experimental investigations of EB FRP systems.

The insulation system not only lengthens the duration of FRP strengthening effectiveness but also influences the properties of concrete and steel, as it reduces the temperature inside the concrete core through the fire duration. Even higher than 5 h of fire resistance (as per ASTM E119 [33]) was achieved in the case of an columns confined by FRP tested with insulation system in a series of experimental investigations carried out by Kodur, Bisby, Chowdhury et al. [34 – 38]. However, it was not possible to determine the time until the debonding of the FRP in any of the aforementioned experimental investigations.

do uszkodzenia) lub nieustalonym (elementy są obciążane do częściowego wykorzystania nośności, a następnie ograniczane aż do uszkodzenia).

Systemy FRP do wzmocnienia zewnętrznego

Odporność ogniową elementów konstrukcyjnych, wzmocnionych zewnętrznie kompozytami FRP, omówiono w [16 ÷ 21], a zasadnicze wnioski płynące z nowszych badań przedstawiono w tabeli 1. Wyniki badań wzmocnionych zewnętrznie elementów zginanych bez dodatkowej izolacji wskazują, że system kompozytowy FRP traci swoją skuteczność nawet po kilku minutach. Zmiany właściwości materiałów systemu wzmacniającego FRP zachodzą nawet przy nieznacznie podwyższonej temperaturze (odpowiadającej temperaturze zeszklenia, tj. 65 – 120°C) [5]. Oprócz degradacji właściwości mechanicznych, krytycznym procesem decydującym o skuteczności zewnętrznego systemu FRP jest odklejanie się warstwy FRP od betonu. Następuje to przede wszystkim z powodu uplastycznienia żywicy używanej do mocowania FRP do elementu. Celem badań opisanych w [22 – 31] była ocena możliwości zastosowania dodatków do żywic, modyfikujących ich zachowanie w podwyższonej temperaturze (np. opóźniających proces uplastycznienia), ale jednocześnie mogą one skutkować pogorszeniem właściwości mechanicznych żywicy. Dobre wyniki badań uzyskiwano w przypadku wykorzystania klejów na bazie spoiw mineralnych lub zastosowania tzw. systemów TRM (ang. *Textile Reinforced Mortar*) [32].

Odporność ogniową elementu konstrukcyjnego zależy w znacznym stopniu od właściwości mechanicznych i termicznych elementu żelbetowego przed wzmocnieniem. Jeżeli stopień wzmocnienia (proporcja zwiększenia nośności uzyskanej w wyniku zastosowania kompozytu FRP w stosunku do nośności elementu przed wzmocnieniem) jest mały, to może okazać się, że nawet po utracie skuteczności systemu FRP, element konstrukcyjny nadal jest w stanie wytrzymać obciążenia przez długi czas w warunkach pożaru (nawet dłużej niż 2 h). Wiąże się to z redukcją obciążeń w warunkach pożaru w porównaniu z maksymalnymi obciążeniami projektowymi. W związku z tym na etapie projektowania zachodzi konieczność właściwej oceny obciążeń w czasie pożaru [20].

W celu opóźnienia procesu odklejania FRP można zastosować wyroby do izolacji przeciwpożarowej. W eksperymentalnych badaniach systemów EB FRP stosowano różne materiały izolacyjne (np. wermikulitowo-perlitowe, cementowe czy krzemianowo-wapniowe) w celu zwiększenia odporności ogniowej.

Zastosowanie systemu izolacji nie tylko wydłuża czas trwania skutecznego wzmocnienia FRP, ale także wpływa na właściwości betonu i stali przez obniżenie temperatury wewnątrz elementu podczas pożaru. W przypadku systemu izolacji słupów zewnętrznie wzmocnionych przez FRP, w serii badań eksperymentalnych wg ASTM E119 [33] przeprowadzonych przez Kodur, Bisby, Chowdhury i wsp. [34 – 38], osiągnięto nośność ogniową nawet większą niż 5 h. Nie udało się jednak określić czasu do odklejania FRP w żadnym z wymienionych badań eksperymentalnych słupów.

Table 1. Summary of the latest research in investigations on EB strengthened concrete elements at/after high-temperature exposure (continued on page 79)
Tabela 1. Podsumowanie najnowszych badań dotyczących elementów wzmocnionych EB w czasie lub po ekspozycji na wysoką temperaturę (cd. na str. 79)

Analysed elements	Test procedure/methods	Main findings	References
Concrete cylinders (Ø150 mm x 300 mm) strengthened with carbon fibre sheets attached to concrete with the use of geopolymer adhesive; specimens with various quantities of fibre layers investigated (0, 1, 2 or 3)	compressive strength after heating (up to 300°); the failure range and type, load-displacement relations, axial and hoop strains analysed	a significant increase of compressive strength at elevated temperature; loss of ductility also noticed	[40] post heat, reduced scale, compression
CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymer) and GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) – confined cylinders (100 mm x 200 mm)	heating up to 300° for 1, 2 and 3 hours prior to compressive tests	the loss of compressive strength due to heating increased with the elongation of elevated temperature submission time and for 3 hours of heating was equal to approx. 25% for the CFRP system and 38% for the GFRP system	[41] post heat, reduced scale, compression
Concrete cylinders (Ø70 mm x 300 mm) wrapped with BFRP (Basalt Fibre Reinforced Polymer); common and temperature-resistant epoxy adhesives; an additional external shell was cast for some series, using of plain and polypropylene-microfiber-reinforced concrete	heating up to 140° for 3 hours before compressive tests	the presence of concrete shell caused the increase of maximum force by 14%; adding polypropylene fibres to the concrete shell resulted in improved carrying ability, however, strain values also significantly increased	[42] post heat, reduced scale, compression
CFRP and GFRP confined concrete cylinders (Ø110 mm x 220 mm) with thermal insulation	heating at various levels of temperature (up to 350°) for 2 hours, prior to compressive tests (performed after cooling down the cylinders)	insulation systems appeared to be effective at higher values of temperature (e.g. 350°) in terms of the ultimate strength increasing in comparison to non-insulated cylinders; a gain of ultimate strength was higher in the case of the plaster layer (83% for GFRP and 56% for CFRP at 350°) rather than for mortar (66% and 31%, respectively)	[43] post heat, reduced scale, compression
CFRP strengthened concrete cylinders (Ø 4" x 8" – about Ø 100 mm x 200 mm)	numerical simulation using Concrete Damage Plasticity with reference to available experimental data; after hygrothermal treatment at the temperature of 100° and 180°, compressive strength tests performed	good resemblance to experimental data (difference up to 27% concerning failure load)	[44], [45] post heat, reduced scale, compression
Circular RC columns, Ø242 mm x 900 mm; reinforced with 4 10 mm steel main bars and 5 circular 6 mm steel stirrups) strengthened with various techniques: (1) no strengthening, (2) one layer of CFRP sheet (part of the specimens with cement-based thermal insulation), (3) one layer of 5 CFRP strips combined with NSM steel bars (part of the specimens with cement-based thermal insulation), (4) one layer of GFRP sheet combined with NSM steel bars, (5) Textile Reinforced Mortar (TRM) combined with NSM steel bars; each strengthened column designed to have a similar bearing capacity at ambient temperature	heating up to 800° for 3 h prior to compressive testing	higher loss of stiffness had been demonstrated rather than loss of capacity; registered load was not below the service load level for insulated columns submitted to 3 hours long heating at temperature 800°, which proves the effectiveness of the proposed insulation method; efficiency of strengthening techniques submitted to heating prior to compressive tests was highest for GFRP with NSM steel bars technique; TRM with NSM steel bars system appeared to be most effective in terms of total strain energy per unit volume at ambient temperature	[46] post heat, reduced scale RC (Reinforced Concrete) columns, compression
100 mm x 100 mm x 300 mm RC columns; non-reinforced or with following reinforcement: 4 main steel bars – 4.4 mm; and 6 rectangular steel stirrups – 4.4 mm; CFRP or GFRP wrapped	heating (up to 720°) for 3 hours prior to compressive strength testing; some of the specimens were cured in water for 3 days after heating	experimental results were compared to the model presented in ACI 440.2R–08 [47], which demonstrated high deviations from experimental results; calibration of the model was proposed and differences up to about 5% were obtained for modified formulas	[48] post heat, reduced scale, RC columns
Thermally insulated full-scale RC columns; Ø400 x 3734 mm or 305 mm x 305 mm x 3734 mm (with rounded corners); column with circular cross section: spiral steel transverse reinforcement with 50 mm pitch, 11.3 or 10 mm and 8 main steel bars with 19.5 mm or 20 mm diameter; column with rectangular cross section: 10 mm steel ties spaced at about 300 mm and 4 25 mm main steel; 1 or 2 layers of CFRP	fire resistance tests along with numerical simulations	if the specimen did not fail until gaining 5 hours of fire resistance, the mechanical load was increased till failure of the element; a good agreement between numerical and experimental results; the use of fire insulation resulted in fire resistance increase from 210 min to over 300 min; shrinkage cracks noted in spray-applied thermal insulation should be investigated and eliminated for better performance of the system	[49], [37], [38], [50] fire resistance, full-scale, RC columns
400 mm x 150 mm x 3000 mm RC slabs; 4 Ø 12 mm bars; 1 or 2 layers of CFRP; with or without gypsum insulation boards, with or without rockwool	ISO 834 fire exposure; influence of temperature changes on constituent materials' parameters and bond degradation due to temperature increase was considered in the FEM simulation	the numerical model validated on the basis of previous experimental results of fire tests in terms of deflections and temperature distribution; the consequences of neglecting bond strength reduction due to temperature rise were highlighted, as it may lead to overestimation of overall elements' fire resistance; proper use of thermal insulation can lead to an increase of fire resistance in CFRP EB RC slabs by 60-90 minutes; achieving T_g value in CFRP did not cause the failure of the element	[51], [52] fire resistance, full scale, RC slabs
Concrete beams 16" x 4.3" x 4.1" (about 406 mm x 109 mm x 104 mm); CFRP at the bottom of the beam	after heating up to 180°, 3-point bending tests performed, FEM analysis with CDP model for concrete was used to visualize the cracking process	good agreement with experimental results (max discrepancy at the level of 27%); proposed numerical model enabled step-by-step visualization of damage evolution process	[44], [45] post heat, reduced scale, concrete beams

Table 1. Summary of the latest research in investigations on EB strengthened concrete elements at/after high-temperature exposure (continued from page 78)

Tabela 1. Podsumowanie najnowszych badań dotyczących elementów wzmocnionych EB w czasie lub po ekspozycji na wysoką temperaturę (cd. ze str. 78)

Analysed elements	Test procedure/methods	Main findings	References
4 types of beams, designed to achieve typical forms of failure; 200 mm x 450 mm x 4000 mm beams with 4 main steel bars (12 mm) and stirrups spaced at 100 mm near supports and 250 mm in the mid-span; 4 point bending tests; CFRP strengthened elements	failure process analysis of CFRP strengthened elements (without thermal insulation) submitted to temperatures up to 70°C during the mechanical tests	differences between thermal coefficients of concrete and FRP caused propagation of thermal stresses, especially near the plate ends; tests of full-scale beams revealed that failure modes observed closer to the anchorage zone (called in [19] as “debonding at the end anchorage zone” and “concrete-cover rip-off”) were more affected by the temperature influence than those achieved in other parts of the beam (“debonding due to high shear stresses” and “debonding at shear cracks”)	[19] during heating, full scale, RC beams
RC beams (150 mm x 300 mm x 3400 mm), 2 x 10 mm steel main bars on the upper and bottom part of the beam section, 6 mm steel stirrups spaced at 150 mm; strengthened with CFRP laminates (50 mm x 1.2 mm, ended 125 mm before the support); insulated with three types of materials: sprayed vermiculite-perlite, expanded clay aggregates and ordinary Portland cement	fire resistance tests	vermiculite-perlite insulation material appeared to be most effective; good mechanical performance of the mortar and its low thermal conductivity is the reason for the better performance of element insulated with VP; in the case of expanded clay aggregates premature loss of effectiveness was observed despite low thermal conductivity, which was attributed to its worse mechanical properties and lower surface adherence	[53] fire resistance, full scale, RC beams
2 beams 200 mm x 450 mm x 4700 mm (Figure 1a), L1 and L2 designations, and 2: 200 mm x 500 mm x 5200 mm – L3 and L4; bottom reinforcement bars, steel: L1 and L2 – two 12 mm bars; L3 – 2 16 mm; L4 – 2 20 mm; upper bars, steel: L1 and L2 – 2 8 mm; L3 and L4 – 2 8 mm; CFRP sheets (200 mm x 0.167 mm), 2 layers; U – wrap anchorages additional insulation; thermal insulation in various configurations	fire resistance tests; load ratios: 0.435 or 0.63; temperature measured at concrete- FRP interface	satisfactory level of fire resistance of even 2 hours was obtained for CFRP-strengthened RC structural elements with 50 mm thick coating, calcium silicate board and ultra-thin fireproof coating located on whole span fire endurance; the T_g value in the strengthening system was reached after only 60 min. of fire without resulting in element's failure; the major role of fire insulation was seen in preventing from adhesive failure in an early stage of fire exposure and limiting the reduction of concrete and internal reinforcement performance due to temperature rise in the later stage; the location of the anchorage outside the fire-exposed zone was confirmed to significantly enhance the fire performance of the strengthened element	[54] fire resistance, full scale, RC beams
CFRP reinforced thermally insulated rectangular RC beams; 200 mm x 300 mm x 3000 mm, 200 mm x 500 mm x 6000 mm, 100 mm x 120 mm x 1500 mm, 200 mm x 500 mm x 5200 mm, 250 mm x 400 mm x 4400 mm	comparative numerical analysis in reference to five experimental investigations: [54 – 58] in standard fire tests; load ratios: 0.36 – 0.63; four- or six-point bending	neglecting temperature dependence of FRP thermal properties does not affect predicting of sectional temperature; there is, however, the necessity of taking into account alteration of insulation's thermal parameters due to temperature increase; both – neglecting loss of bond strength due to temperature increase on FRP/concrete interface or assuming a complete loss of such strength – leads to unrealistic results; non-linear bond-slip relations are suggested to give a better assessment of the fire resistance of bent FRP EB RC structural elements	[59] fire resistance full scale, RC beams
Insulated T-shaped beams; Figure 1b – cross-section (3900 mm span length); CFRP protected with vermiculite-gypsum plaster	parametric FEM study in reference to earlier experimental data [60], [61]; fire resistance tests	good agreement in terms of temperature distribution and mid-span deflections; although increasing moisture content appeared to enhance the thermal performance of the beam, its influence on the structural performance of the element should not be neglected; nonlinear increase of mid-span deflections was reported as a result of the increase of total strain and cracking propagation process	[62], [63] fire resistance, full-scale RC beams
RC beams with two types of strengthening: CFRP and CFRP and (Carbon Fibre Reinforced Geopolymer); dimensions: 250 mm x 400 mm x 5300 mm; reinforcement: 2 steel longitudinal 22 mm bars in tension and 2 steel longitudinal 12 mm bars in compression; 10 mm thick fire insulation at the bottom of the beam and on 80 mm height parts of sides	6 point bending test, load ratio 0.5-0.53; fire resistance tests	CFRG strengthening system remained fully effective under high-temperature exposure, thus, CFRG strengthened structural elements revealed lower deflections for a longer duration; however, the fire resistance of CFRG-strengthened elements was not higher than CFRP CFRP-strengthened beams; applying a layer of primer between geopolymer and insulation was proposed as a solution to premature debonding of thermal insulation of CFRG system cracking	[56] fire resistance, full scale, RC beams
Various insulation materials and thicknesses and fire scenarios	artificial neuron network used to develop a model to predict fire resistance of CFRP-strengthened T-beams with thermal insulation	preliminary guidelines for design of such systems	[64] fire resistance, full scale, RC beams
CFRP strengthened concrete joints of a three-story RC frame (Figure 2); horizontal element – 210.5 mm x 210.5 mm cross-section, 8 steel 10 mm reinforcing bars; vertical element – 175 mm x 210.5 mm, 5 steel 10 mm reinforcing bars; the length of CFRP- strengthened area: 175 mm (in each of three directions)	fire resistance after simulated earthquake loads (cyclic lateral loads); three performance levels were analyzed according to FEMA356, which were: immediate occupancy (IO), life safety (LS) and collapse prevention (CP) – drift (the ratio of lateral drift to total height of specimen) values 1.0, 2.0 and 4.0%, respectively	research is particularly significant in relation to real situation elements' performance predictions as earthquakes often are followed by fire; a significant increase in PEF (Post Earthquake Fire) resistance was noted for CFRP-strengthened elements at LS and CP levels, which was 25% and 35% respectively; relocation of the plastic hinge from the joint face further out into the beam influences such increase in PEF resistance value	[65] fire resistance, full scale, RC joints
10 beams 150 mm x 450 mm x 4700 mm with CFRP strips and with insulation made of gypsum boards and non-insulated	fire resistance tests	fire resistance rating over 4 h achieved	[66] fire resistance, full scale, RC beams

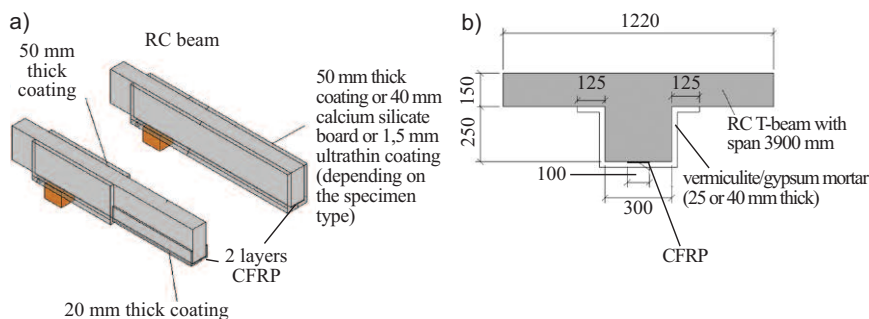


Fig. 1. Examples of thermal insulation schemes analysed in the studies: a) show halves of the beams (L1 and L2) – cut in the middle of the span [54]; b) a cross-section of the analysed beam; dimensions in mm [62]

Rys. 1. Przykładowe schematy izolacji termicznej analizowane w badaniach: a) połówki belek (L1 i L2) ścięte w środku przęsła [54]; b) przekrój poprzeczny analizowanej belki; wymiary w mm [62]

In terms of bent elements, insulation systems have also been proven useful in postponing the loss of effectiveness of FRP systems. Additionally, applying so-called “cold anchorages” [20] – thicker insulation layers at the ends of the FRP composites or locating anchorages of the FRP in zones with lower temperatures – extends the duration of the FRP strengthening system effectiveness. After the composite debonding in a thinner insulation zone, FRP at “the cold anchorage” remains attached to the element. The FRP composite works as a cable, attached to the concrete at the ends, and is still able to transfer part of the loads owing to the catenary action. In such case sufficient length of the composite should be insulated thick so the critical temperature in the FRP is not gained in part of the strengthening system, but such sufficient length is not promptly defined so far.

Tests of unloaded externally strengthened structural elements (with or without insulation) aimed to determine the thermal performance of the element through fire duration and calibration of the developed numerical models. Determining the temperature distribution during a fire is crucial in terms of the assessment of the time when the critical temperature is supposed to be attained in the strengthening system materials under fire exposure. Two critical temperatures should be considered: achieving the first of them in FRP composite matches the loss of FRP effectiveness under fire exposure, while the second causes irreparable changes and the necessity of material replacement after the fire. The relations between these temperature values and T_g values have already been a matter of concern for up-to-date investigations, but further research should be carried out due to, amongst other factors, variability of used material solutions. In some studies [20] it was pointed out that using the T_g value as the temperature corresponding to the loss of effectiveness of the FRP system is rather conservative. In addition, some of the methods and definitions used to obtain T_g values remain controversial.

The importance of the analyses of thermal distribution along the height or length of the structural element has been underlined in the article [17]. Various numerical models have been developed to analyse the thermal and structural

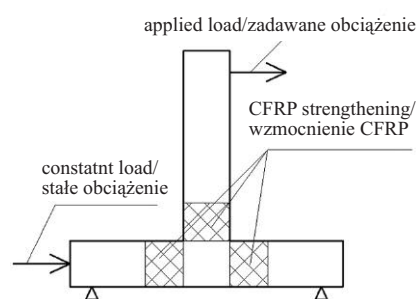


Fig. 2. Scheme of CFRP strengthened concrete joint, own preparation on the basis of [65]

Rys. 2. Schemat betonowego połączenia wzmocnionego CFRP; opracowanie własne na podstawie [65]

W przypadku elementów zginanych, systemy izolacji termicznej również okazały się przydatne w opóźnianiu utraty skuteczności systemów FRP. Dodatkowo zastosowanie tzw. zimnych kotwień [20] – grubszych warstw izolacyjnych na końcach kompozytów FRP lub usytuowanie zakotwień FRP w strefach o niższej temperaturze – wydłuża czas działania systemu wzmacniającego FRP. Po odspojeniu kompozytu w cieńszej strefie izolacji, FRP w zimnym zakotwieniu pozostaje przymocowany do elementu. Kompozyt FRP działa wówczas podobnie jak kabel przymocowany do betonu na obu końcach i nadal jest w stanie przenosić część obciążeń dzięki działaniu łańcuchowemu. W takim przypadku należy izolować grubą warstwą odpowiednią długość kompozytu tak, aby temperatura krytyczna w FRP nie została przekroczona jedynie w części systemu wzmacniającego. Dotychczas nie określono jednak jednoznacznie, ile wynosi odpowiednia długość.

Celem badań nieobciążonych zewnętrznie wzmocnionych elementów konstrukcyjnych (z izolacją lub bez) było określenie parametrów cieplnych elementu przez czas trwania pożaru oraz kalibracja opracowanych modeli numerycznych. Określenie rozkładu temperatury w elemencie podczas pożaru ma kluczowe znaczenie do oceny czasu, w którym zostanie osiągnięta temperatura krytyczna w materiałach systemu wzmacniającego narażonych na działanie ognia. Należy wziąć pod uwagę dwie krytyczne wartości temperatury: pierwsza odpowiada utracie skuteczności FRP pod wpływem ognia, natomiast druga skutkuje trwałymi zmianami i koniecznością wymiany materiału po pożarze. Relacje między tymi wartościami temperatury a temperaturą zeszklenia (T_g) były już wprawdzie celem badań, ale ich kontynuowanie jest konieczne m.in. ze względu na różnorodność stosowanych rozwiązań materiałowych. Niektóre wyniki badań sugerują [20], że stosowanie wartości T_g jako temperatury odpowiadającej utracie skuteczności systemu FRP ocenia się jako podejście zbyt konserwatywne. Ponadto nie wszystkie metody i definicje stosowane do określania wartości T_g uznaje się za właściwe.

Znaczenie analiz rozkładu temperatury wzdłuż wysokości lub długości elementu konstrukcyjnego podkreślono w artykule [17]. Opracowano różne modele numeryczne do analizy parametrów termicznych i strukturalnych elementów oraz

performance of the elements and their constituent materials. Notably, the methodology for determining the stress level obtained in the composite under heat exposure still remains unclear.

Regarding the numerical models of FRP-strengthened beams and slabs, the main consideration is related to the temperature-dependent bond performance of the FRP-concrete (or epoxy adhesive). Developing and validating FRP-adhesive-concrete slip models is crucial for the proper assessment of FRP FRP-strengthened concrete bent structural elements. At the same time, a limited amount of data is already available, while some of the results are contradictory.

Considerations of possible scenarios when designing CFRP EB strengthened structural elements in a fire situation were summarised in [39]. These considerations relied on experimental investigations of full-scale thermally insulated and non-insulated elements with various levels of load ratios (100 – 163% of their design capacity in fire situations prior to strengthening). The suggested scenarios were the following:

- **scenario 1** – load level in fire lower than the resistance of the beam prior to CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymer) strengthening, thus no fire protection needed;
- **scenario 2** – load level in fire lower than the resistance of the beam prior to CFRP strengthening, but higher than resistance in fire, thus regular fire protection needed;
- **scenario 3** – load level in fire higher than the resistance of the beam prior to CFRP strengthening, thus extra fire protection is needed.

Near Surface Mounted FRP systems

FRP – concrete bond performance is a critical issue in externally bonded FRP strengthening systems at elevated temperatures, as debonding occurs relatively soon during exposure to elevated or high temperatures. Near Surface Mounted FRP systems (Table 2) partially overcome such limitations, as the FRP composites are not mounted directly on the surface of the element but are placed inside the grooves cut in the cover. As a result, temperature increase is delayed by the surrounding concrete with high heat capacity, which delays the debonding process. In this case FRP composites also are mounted using special adhesives (epoxy or grout). The role of the adhesive is to provide good anchorage of FRP to concrete so that the tensile or shear composite reinforcement can act effectively. Better bonding allows achieving higher level tensile stresses in FRP during fire [5]. Bisby et al. [20] pointed out that higher fire resistance of NSM-strengthened concrete structural elements (when comparing to EB-strengthened elements) and higher critical temperature values in NSM systems might be attributed to: thermal insulation caused by partial embedment in concrete, mechanical confinement provided by surrounding concrete and better bonding performance.

wchodzących w ich skład materiałów konstrukcyjnych. Należy jednak podkreślić, że jednoznaczny sposób określania poziomu naprężeń, uzyskiwanego w kompozycie pod wpływem strumienia ciepła, pozostaje nieokreślony.

W odniesieniu do modeli numerycznych belek i płyt wzmocnionych FRP, głównym przedmiotem analiz jest charakterystyka przyczepności betonu i FRP (lub kleju epoksydowego) zależna od temperatury. Opracowanie i walidacja modeli poślizgu warstwy kleju w stosunku do betonu ma kluczowe znaczenie do prawidłowej oceny zginanych elementów konstrukcyjnych z betonu wzmocnionego FRP. Jednocześnie dostępna jest ograniczona liczba danych, a ponadto niektóre są sprzeczne.

Rozważania na temat możliwych scenariuszy podczas projektowania elementów konstrukcyjnych wzmocnionych CFRP EB w sytuacji pożaru podsumowano w [39]. Rozważania te opierały się na badaniach eksperymentalnych pełnowymiarowych elementów izolowanych termicznie i nieizolowanych o różnym poziomie współczynników obciążenia (100 – 163% ich nośności projektowej w sytuacjach pożarowych przed wzmocnieniem). Sugerowane scenariusze były następujące:

- **scenariusz 1** – poziom obciążenia w pożarze niższy niż odporność belki przed wzmocnieniem CFRP (ang. Carbon Fibre Reinforced Geopolymer), a więc nie jest wymagana ochrona przeciwpożarowa;
- **scenariusz 2** – poziom obciążenia w pożarze niższy niż odporność belki przed wzmocnieniem CFRP, ale wyższy niż odporność w ogniu, a więc potrzebna jest regularna ochrona przeciwpożarowa;
- **scenariusz 3** – poziom obciążenia w pożarze wyższy niż odporność belki przed wzmocnieniem CFRP i w związku z tym potrzebna jest dodatkowa ochrona przeciwpożarowa.

Systemy FRP montowane blisko powierzchni

Przyczepność FRP jest krytycznym zagadnieniem w zewnętrznie montowanych systemach wzmacniających FRP w podwyższonej temperaturze, ponieważ ich odklejenie następuje dosyć szybko ze wzrostem temperatury. Problem ten jest częściowo eliminowany przez systemy FRP montowane przypowierzchniowo (tabela 2), ponieważ kompozyty FRP nie są mocowane bezpośrednio na powierzchni elementu, ale umieszczane wewnątrz rowków wyciętych w otulinie. W rezultacie przyrost temperatury jest spowolniony ze względu na dużą pojemność cieplną otaczającego betonu, co powoduje opóźnienie procesu odklejenia FRP. W tym przypadku kompozyty FRP również są montowane za pomocą specjalnych klejów (epoksydowych lub mineralnych), których rolą jest zapewnienie dobrego zakotwienia FRP do betonu, tak aby zbrojenie kompozytowe mogło działać skutecznie na rozciąganie lub ścinanie. Lepsza przyczepność pozwala na osiągnięcie wyższego poziomu naprężeń FRP podczas pożaru [5]. Bisby i in. [20] zwrócili uwagę, że większą odporność ogniową elementów konstrukcyjnych z betonu wzmocnionego NSM, w porównaniu z elementami wzmocnionymi EB, jak również większą temperaturę krytyczną w systemach NSM można przypisać: izolacji cieplnej, zapewnionej w wyniku osadzenia w betonie, mechanicznemu ograniczeniu przez otaczający beton oraz lepszej przyczepności.

Table 2. Summary of the latest research in investigations on NSM-strengthened concrete elements at/after high-temperature exposure

Tabela 2. Podsumowanie najnowszych badań elementów wzmocnionych NSM w czasie lub po ekspozycji na wysoką temperaturę

Analysed elements	Test procedure/methods	Main findings	References
RC slab: 80 mm x 300 mm x 2000; CFRP mounted with epoxy resin inside 5 mm x 15 mm grooves; 4 steel 6 mm reinforcement bars	four-point bending test under steady and transient state conditions at the temperature up to 80°C	regarding the results of steady-state tests, the slab submitted to 40°C demonstrated the highest values of capacity, which was explained by post-curing processes in an epoxy adhesive; however, for 80°C temperature a decrease in ultimate load value was observed (by 12% in comparison to ambient temperature); for transient state tests, a significant increase in deformations for slabs was observed during the heating phase	[67] during heating, RC slabs
60 beams strengthened with the NSM method; specimens differed also in terms of epoxy application locations (full, partial or only at the ends; 150 mm x 150 mm x 750 mm; 2 x 8 mm steel bars at the top, 2 x 10 mm steel bars at the bottom; CFRP 12 mm rod mounted with two-part epoxy adhesive	after submission to various conditioning processes: temperature 70-180°C for 1-8 hours and five weeks of wetting and drying in freshwater, brine, water and magnesium sulphate	severe drop in ultimate load value was observed even after exposure to 70°C for 1 hour; exposure to temperature 180°C for 2 – 8 hours resulted in a reduction by about 60 – 65% of ultimate load value, while 1 hour of exposure to 180°C differed from this trend and reduction was at the level of about 30% in that case	[68] after heat, reduced scale, RC beams
12 flexural tests on reinforced concrete beams un-strengthened and strengthened with the use of the NSM technique; 150 mm x 150 mm x 1450 mm; T_g values: 160°C – 220°C and T_d (decomposition temperature): 320°C – 360°C	thermal performance of NSM systems' materials under heat exposure up to 600°C; tests performed in different configurations (three-point bending and single cantilever)	according to the provided data, loss of bond between CFRP bar and cementitious grout occurs around the midpoint of the decomposition temperature	[69] during heating, reduced scale, RC beams
Beams 150 mm x 150 mm x 1450 mm beams with NSM singular CFRP strengthening bar mounted with cementitious grout; 2 x 6 mm steel bars at top, 2 x 10 mm steel bars at bottom; 16 mm x 16 mm groove, inside which 8 mm CFRP bar mounted	flexural loading at ambient temperature and fire resistance test; experimental and numerical analysis	a considerable increase in failure load (17 – 25%) and yielding load (32 – 36%) was obtained during ambient temperature flexural tests; providing anchorage in cool regions at lengths not less than 300 mm enabled NSM beams to sustain the typical service load at temperatures up to 600°C; the potential of prolonging overall system performance by applying thermal insulation at ends only instead of on all lengths of the beam has been confirmed	[70] fire resistance, reduced scale, RC beams
GFRP NSM strengthened beams; 200 mm x 300 mm x 2000 mm; mortar and epoxy adhesives; 2 x 29 mm steel main reinforcement bars; GFRP with two lap splice areas with a length of 400 mm each	after removing specimens from the furnace and cooling down, flexural tests were performed	the epoxy technique appeared to be more effective in terms of increasing elements' carrying flexural loads after heat exposure, while the use of mortar adhesive appeared to be more beneficial in terms of deformability of the structural element; the analytical model was proposed with good resemblance to experimental data in terms of failure mode, strength and deformation prediction	[71] after heat, reduced scale, RC beams
Beams 140 mm x 180 mm x 2400 mm; 1, 2 or 3 CFRP strips at the bottom; epoxy adhesive	flexural tests during heating up to 85°C	no significant difference (in reference to ambient temperatures) for beams tested at temperatures lower than T_g ; increase of temperature to 70 and 85 °C caused reduction of load capacity and change of failure mode (from FRP rupture to FRP debonding and concrete crushing)	[72] during heating, reduced scale, RC beams
NSM and EB beams with various thicknesses of thermal insulation in the anchorage zone and the rest of the span; 100 mm x 120 mm x 1500 mm beams; 2 x 6 mm steel reinforcement bars at top and 2 x 6 mm bars at the bottom; fire protection (calcium silicate boards) thickness: anchorage zone – 0-50 mm; rest of the span – 0-25 mm; NSM (two CFRP strips 10 mm x 1.4 mm, epoxy-based adhesive) or EB (one 20 x 1.4 mm CFRP strip, epoxy based adhesive)	fire resistance – temperature growth as per ISO 834 [73]; four-point bending test; numerical model in reference to existing experimental data ([55], [74])	the 3D models were able to accurately predict temperature distribution along the FRP-concrete interface, which was marked by a good resemblance to experimental data; a significantly longer time of debonding was noticed for NSM systems when compared to EB ones, which confirmed their better performance in a fire situation; CFRP debonding occur for average temperature along the anchorage zone in the FRP-concrete interface at the range from 1.2 T_g to 1.4 T_g value for the EB system, while for NSM it was 2.4 to 4.2 T_g ; different critical values of temperature are suggested to be used when designing both strengthening systems ; for NSM additional insulation along the span resulted in notable fire resistance improvement, while for EB only thickness of insulation in the anchorage zone played a significant role	[75] fire resistance, reduced scale; RC beams
100 mm x 120 mm x 1500 mm beams; 2 x 6 mm steel reinforcement bars at top and 2 x 6 mm bars at the bottom; strengthened in flexure by CFRP strips; various thicknesses of insulation were used – from 0 to 25 mm at the midspan of the beam and 0 to 50 mm at the anchorage zone; the effectiveness of calcium silicate boards as thermal insulation was also analysed; two types of adhesives: epoxy and grout	parallel to the research of EB specimens described in [55]; ISO 834 [73] standard fire tests	for the NSM technique mechanical contribution of the FRP system was lost after even 114 min (for 50 mm thick insulation at the anchorage zone and 25 mm in the central part of the beam), while for reference EB strengthened specimens it was not more than 40 min; the average temperature in the adhesive at the moment of effectiveness loss of the strengthening system was at the level of 2.2-6.6 T_g value, while for EB it was only 1.2-1.5 T_g	[74] fire resistance, reduced scale, RC beams
RC beams; span: 2 – 5 m; height: 200 – 500 mm; thickness: 130 mm – 310 mm	proposed simplified method of designing EB and NSM FRP beams submitted to fire with an insulation system; numerical analysis of the behaviour of beams with partial debonding of FRP, which might be used for the design of structural elements with thicker insulation in FRP anchorage area in a fire situation; the model was calibrated with the use of reduced-scale beam results from available literature [76] (also at ambient temperature); then numerical parametric study was performed	numerical simulations confirmed better performance of NSM FRP beams when compared to EB ones; for the detached length of FRP equal 10% of free span reduction of strength for NSM FRP beams was in the range from 7 to 22%, while for their EB counterparts it was 20 – 40%; it was confirmed that owing to providing proper insulation, after debonding of FRP system in the middle part of the element, while remaining bonded at the ends, FRP will act as a cable, still being able to transfer part of the loads owing to catenary action	[77] fire resistance, full scale, RC beams
250 mm x 110 mm x 1500 mm RC slabs; 3 x 6 mm steel reinforcement bars at top and 3 x 6 mm – at the bottom; EB, NSM or Continuous Reinforcement Embedded at the Ends (CREatE) strengthening techniques; the CREatE method is about mounting the anchorages of the reinforcement inside angular holes inside the element (in that case 30°, anchorage length 194 mm and curve radius 120 mm; calcium silicate boards fire protection with increased thickness at the ends	fire resistance; four-point bending test; additional numerical simulations concerning this research programme (NSM and EB RC slabs) presented in [78]	2, 16 and 24 min to loss of effectiveness of strengthening systems for unprotected EB, NSM and CREatE systems respectively; constant value of thermal insulation increased these values to: over 90 min (NSM and CREatE) and less than 30 min (EB); an increase in thermal insulation thickness caused an increase to over 120 min (NSM and CREatE) and slightly less than 60 min (EB)	[79] fire resistance, full scale, RC slabs

Summary and conclusions

Experimental and numerical results of up-to-date research have proven that for un-insulated FRP EB systems, loss of effectiveness under fire exposure can be observed even after a very short time because of the softening of the resin and, as a result, debonding FRP from concrete. Using proper thermal insulation layers is proposed as a solution to this problem, and current research on EB FRP structural elements attempts to identify their influence on the FRP system and the behaviour of the entire element for various insulation schemes. Numerical solutions considering simultaneous thermo-mechanical loading are sought and new material possibilities for thermal insulation are experimentally tested.

As full-scale tests might be expensive, reduced-scale tests can be performed as preliminary investigations. An example of such tests might be experimental investigations on confined concrete cylinders or short-span beams. Reduced-scale element tests aim to enable an analysis of occurring processes to conclude preliminary assumptions appropriate for bigger elements. However, the “scale effect” should not be neglected.

Accurate assessment of the temperature distribution in the cross-section and along the concrete structural element is crucial for determining design rules in fire situations with a satisfactory level of safety. All the above-described experimental and numerical investigations aim to determine proper design guidelines in terms of the fire behaviour of structural concrete elements strengthened with FRPs.

It has been confirmed that providing anchorage of FRP in the colder zone (e.g. when thicker thermal insulation in that area is used) might have a positive influence on the overall behaviour of the concrete elements incorporating FRP reinforcement. NSM-mounted systems have a beneficial influence in terms of their high-temperature fire resistance in reference to EB systems, as the mounting reinforcement inside the concrete element provides additional thermal insulation. Providing anchorages inside the concrete element in drilled holes (CREatE systems) is another promising technique. However, two main problems may be mentioned in that case: providing good dispersion of adhesive inside the drilled hole in order to achieve the highest bonding performance (which may be especially difficult to achieve at the construction site) and avoiding existing reinforcement during drilling (which may be dense in elements planned to be strengthened/repared in the close-to-support area owing to intensifications of shear forces).

The available numerical simulations have demonstrated high accuracy in EB or NSM strengthened concrete structural elements' fire resistance determination. Extended material tests should always be a source of input data in that case (to determine material parameters). It is recommended to determine glass transition temperature (T_g) and decomposition temperature (T_d) of used FRP, as well as the influence of temperature on its deformability and strength. Similar analysis should be carried out for the adhesives,

Podsumowanie i wnioski

Dotychczasowe wyniki eksperymentalne i numeryczne dowiodły, że w przypadku nieizolowanych systemów FRP EB utratę skuteczności pod wpływem ognia można zaobserwować nawet po bardzo krótkim czasie z powodu zmiękczenia żywicy i w efekcie odklejenia FRP od betonu. Jako rozwiązanie tego problemu proponuje się zastosowanie odpowiednich warstw izolacji termicznej. Obecne badania nad elementami konstrukcyjnymi EB FRP są próbą określenia wpływu tych warstw na system FRP oraz zachowania całego elementu w przypadku różnych schematów izolacji. Poszukiwane są rozwiązania numeryczne dotyczące jednoczesnego oddziaływania obciążeń termomechanicznych, a także testuje się doświadczalnie nowe możliwości materiałowe w zakresie izolacji termicznej.

Badania w pełnej skali geometrycznej wymagają dużych nakładów finansowych, dlatego też alternatywę mogą stanowić badania w skali zredukowanej, jako badania wstępne. Przykładem są badania eksperymentalne wzmacnianych walców betonowych lub belek o małej rozpiętości. Testy elementów w zmniejszonej skali mają na celu umożliwienie analizy zachodzących procesów w celu sformułowania wstępnych założeń dotyczących pełnowymiarowych elementów. Należy jednak uwzględnić „efekt skali”.

Dokładna ocena rozkładu temperatury w przekroju i wzdłuż elementu konstrukcyjnego ma kluczowe znaczenie do określenia zasad projektowania w sytuacjach pożarowych, z zachowaniem zadowalającego poziomu bezpieczeństwa. Opisane badania eksperymentalne i numeryczne w tym zakresie mają na celu określenie właściwych wytycznych projektowych dotyczących odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych z betonów wzmacnianych FRP.

Potwierdzono, że zakotwienie FRP w chłodnej strefie (np. z zastosowaniem grubszej izolacji termicznej w tym obszarze) może mieć pozytywny wpływ na ogólne zachowanie się elementów ze zbrojeniem FRP. Systemy montowane przypowierzchniowo (NSM) mają korzystny wpływ na odporność ogniową takich elementów konstrukcyjnych w wysokiej temperaturze w porównaniu z systemem EB, ponieważ umieszczenie kompozytu wewnątrz elementu zapewnia dodatkową izolację termiczną. Kolejną obiecującą techniką jest zapewnienie zakotwień wewnątrz elementu w wywierconych otworach (systemy CREatE). W tym przypadku można jednak wymienić dwa główne problemy: zapewnienie dobrego rozprowadzenia kleju wewnątrz wywierconego otworu w celu uzyskania najlepszych parametrów klejenia (może to być szczególnie trudne do osiągnięcia na budowie) oraz uniknięcie istniejącego zbrojenia przy wierceniu (może ono być gęste w elementach planowanych do wzmocnienia/naprawy w obszarze przypodporowym ze względu na intensyfikację sił ścinających).

Dostępne symulacje numeryczne wykazały dużą dokładność w określaniu odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych wzmacnianych w systemach EB lub NSM. Źródłem danych wejściowych (tj. parametrów materiału) zawsze powinny być w takim przypadku szerokie badania materiałowe. Zaleca się określanie temperatury szklenia (T_g) oraz dekompozycji (T_d) zastosowanego FRP oraz wpływu temperatury

paying particular attention on bond performance issues and its reduction at high temperature. In addition, thermal expansion tests for FRP and adhesives are recommended to achieve higher accuracy in terms of thermal bowing assessment and deflection prediction.

It has already been proven that EB FRP strengthened concrete columns can achieve a satisfactory level of fire resistance when thermally insulated. More accurate numerical models might enable a better assessment of the fire performance of such structural elements, especially in terms of determining the time when the EB system bond between the concrete and FRP is lost based on the temperature distribution in the element.

Most current investigations on FRP-strengthened bent structural elements (such as beams and slabs) have focused on thermally insulated systems. The efficiency of such insulation use in aim to provide sufficient fire performance in terms of the bearing capacity of the element has been confirmed. The usefulness of such materials as vermiculate perlite and calcium silicate boards as insulation layers has been confirmed. However, the exploration of new material solutions in that area is still recommended. In such investigations, apart from the thermal properties of insulation materials, their mechanical properties, toxicity, and flame spread parameters should also be considered. Additionally, not only insulation material type and thickness account for the determination of fire behaviour of such structural elements, but also insulation material location along the element and in its cross-section is important. In the area of material solutions, also the adhesives based on cementitious and geopolymer composites have provided interesting results.

The potential use of EB FRP concrete structural elements in regions threatened by earthquakes should be carefully considered with the use of additional data from post-earthquake fire resistance tests, as a very limited amount of data is currently available in that area.

Although NSM systems have already been proven to demonstrate better performance at elevated temperatures than EB structural elements, only a limited number of experimental and numerical investigations are available. Despite some similarities in both systems, debonding processes seem to occur at very different temperatures for the NSM and EB systems (e.g. in relation to the glass transition temperature). Despite the benefits gained from “hiding” FRP inside grooves cut in concrete covers, NSM also systems require additional thermal insulation to provide a safe level of their effectiveness in a fire situation.

Received: 22.07.2025

Revised: 15.09.2025

Published: 23.12.2025

na jego odkształcalność i wytrzymałość. Podobną analizę właściwości materiałowych należy również przeprowadzić w przypadku zastosowanego kleju, zwracając wówczas szczególną uwagę na kwestie związane z przyczepnością oraz jej redukcją pod wpływem temperatury. Ponadto zaleca się prowadzenie dodatkowych testów rozszerzalności cieplnej FRP i kleju w celu uzyskania dużej dokładności w ocenie odkształcenia termicznego i przewidywanego ugięcia. Udowodniono już, że słupy betonowe wzmocnione w systemie EB FRP mogą osiągnąć zadowalający poziom odporności ogniowej po zastosowaniu izolacji termicznej. Dokładniejsze modele numeryczne umożliwią lepszą ocenę odporności ogniowej takich elementów konstrukcyjnych, szczególnie dotyczącą określenia czasu, w którym przyczepność FRP do betonu zostaje utracona na podstawie wyników rozkładu temperatury w elemencie.

Większość obecnych badań nad zginanymi elementami konstrukcyjnymi wzmocnionymi FRP (np. belki i płyty) koncentruje się na systemach izolowanych termicznie. Potwierdzono skuteczność zastosowania takiej izolacji w celu zapewnienia wystarczającej nośności ogniowej. Potwierdzono przydatność takich materiałów, jak płyty wermikulitowo-gipsowe czy krzemianowo-wapniowe, jako warstw izolacyjnych. Nadal jednak konieczne jest poszukiwanie nowych rozwiązań materiałowych. W tego typu badaniach, oprócz właściwości cieplnych materiałów izolacyjnych (zmiennych wraz ze wzrostem temperatury), należy również wziąć pod uwagę ich właściwości mechaniczne, toksyczność oraz parametry rozprzestrzeniania się płomienia. Ponadto o zachowaniu się takich elementów konstrukcyjnych w warunkach pożaru decyduje nie tylko rodzaj i grubość materiału izolacyjnego, ale także rozmieszczenie wzdłuż elementu i w jego przekroju (np. pogrubienie izolacji w strefach kotwienia systemu FRP). W przypadku rozwiązań materiałowych również kleje na bazie kompozytów cementowych oraz geopolimerowe przyniosły interesujące wyniki w odniesieniu do systemów EB i NSM.

Potencjalne zastosowanie elementów konstrukcyjnych EB FRP w regionach zagrożonych trzęsieniem ziemi powinno być starannie rozważone z wykorzystaniem dodatkowych danych z badań odporności ogniowej po takim zdarzeniu, ponieważ obecnie dostępna jest bardzo ograniczona ilość danych w tym obszarze. Udowodniono wprawdzie, że systemy NSM lepiej zachowują się w podwyższonej temperaturze niż systemy EB, ale dostępna jest ograniczona liczba badań eksperymentalnych i numerycznych. Pomimo pewnych podobieństw w zachowaniu obu systemów, procesy odpasania zachodzą w bardzo różnej temperaturze w przypadku NSM i EB. Należy więc stosować różne wartości temperatury krytycznej (np. w odniesieniu do temperatury zeszklenia) dla obu systemów. Pomimo korzyści płynących z „ukrycia” FRP, wewnątrz rowków wyciętych w otulinie betonowej, systemy NSM również wymagają dodatkowej izolacji termicznej, aby zapewnić bezpieczną ich efektywność w sytuacji pożaru.

Artykuł wpłynął do redakcji: 22.07.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 15.09.2025 r.

Opublikowano: 23.12.2025 r.



Literature

- [1] ACI 440R-96 State-of-the-art report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) reinforcement for concrete structures reported by ACI Committee 440. 2002.
- [2] Newhook J, Svecona D. Reinforcing concrete structures with Fibre Reinforced Polymers. Design manual no. 3. ISIS Canada Research Network. 2007.
- [3] Bank LC. Composites for construction: structural design with FRP materials. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [4] Burgoyne C, Byars E, Guadagnini M, Manfredi G, Neocleous K, Pilakoutas K, Taerwe L, Taranu N, Tepfers R, Weber A. Technical report: FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement in RC structures. *fédération internationale du béton (fib)*, 2007. doi: 10.1371/journal.pntd.0001792.
- [5] 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.
- [6] Elgabbas BF, Ahmed E, 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.
- [7] Thiagarajan P, Pavalan V, Sivagamasundari R. Mechanical characterization of basalt fibre reinforced polymer bars for reinforced concrete structures. *Int. J. Appl. Eng. Res.*, 2018; vol. 13, no. 8, pp. 5858–5862.
- [8] Pareek K, Saha P. Basalt fiber and its composites: an overview. in *Proceedings of National Conference on Advances in Structural Technologies (CoAST-2019)*, 2019.
- [9] Wydra M. PhD thesis: Fire resistance of concrete columns reinforced with BFRP bars. 2023.
- [10] Wydra M, Fangrat J. Concrete construction elements with fibre reinforced polymer reinforcement under fire conditions. *Mater. Bud.* 2025. DOI: 10.15199/33.2025.07.24.
- [11] Ma W, Yin C, Zhou J, Wang L. Repair of fire-damaged reinforced concrete flexural members: A review. *Sustain.* 2019. DOI: 10.3390/sul1195199.
- [12] Chinthapalli HK, Chellapandian M, Agarwal A, Suriya Prakash S. Effectiveness of hybrid fibre-reinforced polymer retrofitting on behaviour of fire damaged RC columns under axial compression. *Eng. Struct.* 2020. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110458.
- [13] Jadooe J, Al-Mahaidi R, Abdouka K. Modelling of NSM CFRP strips embedded in concrete after exposure to elevated temperature using epoxy adhesives. *Constr. Build. Mater.* 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.027.
- [14] Thi CN, Pansuk W, Torres L. Flexural behavior of fire-damaged reinforced concrete slabs repaired with near-surface mounted (NSM) carbon fiber reinforced polymer (CFRP) rods. *J. Adv. Concr. Technol.* 2015. DOI: 10.3151/jact.13.15.
- [15] Kodur V, Naser MZ, Kim HS. Testing Protocols and Procedures for Undertaking Fire Resistance Tests on Concrete Structures Incorporating Fiber-Reinforced Polymers. *Polymers (Basel)*. 2025. DOI: 10.3390/polym17030404.
- [16] Bisby LA, Green MF, Kodur VKR. Response to fire of concrete structures that incorporate FRP. *Prog. Struct. Eng. Mater.* 2005. DOI: 10.1002/pse.198.
- [17] Maraveas C, Miamis K, rakas 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.
- [18] 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. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.031.
- [19] Klammer EL, PhD thesis: Influence of temperature on concrete beams strengthened in flexure with CFRP. *Eindhoven University of Technology*. 2009. DOI: 10.6100/IR656177.
- [20] 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.
- [21] Sharifianjazi F, Zeydi P, Bazli M, Esmailkhanian A, Rahmani R, Bazli L, Khaksar S. „Fibre-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Members under Elevated Temperatures: A Review on Structural Performance. *Polymers (Basel)*. 2022. DOI: 10.3390/polym14030472.
- [22] Petersen MR, Chen A, Roll M, Jung SJ, Yossef M. Mechanical properties of fire-retardant glass fiber-reinforced polymer materials with alumina tri-hydrate filler. *Compos. Part B Eng.* 2015. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.03.071.
- [23] Rowen J, Herring B, Dembsy N. Systems approach to creating FRP to meet 2009 International Building Code requirements for interior composites. *Compos. Technol. Mag.* 2010, [Online]. Available: http://www.avtecindustries.com/IBC_Requirements_for_Interior_Composites-4_3.pdf.
- [24] Asran AG, Ghith HH, Nooman M, M. Sadawy M, Khairy S. Improvement of GFRP properties exposed to fire. *Al-Azhar Univ. Civ. Eng. Res. Mag.* 2018; no. 40, pp. 126–134.
- [25] Zhang ZX, Zhang J, Lu BX, Xin ZX, Kang CK, Kim JK. Effect of flame retardants on mechanical properties, flammability and foamability of PP/wood-fiber composites. *Compos. Part B Eng.* 2012. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.06.020.
- [26] Dholakiya BZ. Use of non-traditional fillers to reduce flammability of polyester resin composites. *Polim.* 2009; vol. 30, no. 1, pp. 10–17.
- [27] Kandola BK, Horrocks, AR Myler P, Blair D. The effect of intumescent on the burning behaviour of polyester-resin-containing composites. *Compos. – Part A Appl. Sci. Manuf.* 2002. DOI: 10.1016/S1359-835X(02)00026-X.
- [28] Liang JZ, Feng JQ, C.Tsui CP, Tang CY, Liu DF, Zhang SD, Huang WF. Mechanical properties and flame-retardant of PP/MRP/Mg (OH) 2/Al (OH) 3 composites. *Compos. Part B Eng.* 2015. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.10.054.
- [29] Nazaré S, Kandola BK, Horrocks AR. Flame-retardant unsaturated polyester resin incorporating nanoclay. *Polym. Adv. Technol.* 2006. DOI: 10.1002/pat.687.
- [30] Wu L, Hoa SV, Wang H. Improvement of flammability resistance of epoxy adhesives used in infrastructure applications. *Can. J. Civ. Eng.* 2007. DOI: 10.1139/L06-135.
- [31] Chakraverty A, Mishra P, Banerjee HD. Investigation of combustion of raw and acid-leached rice husk for production of pure amorphous white silica. *J. Mater. Sci.* 1988. DOI: 10.1007/BF01174029.
- [32] Raoof SM, Bournas DA. TRM versus FRP in flexural strengthening of RC beams: Behaviour at high temperatures. *Constr. Build. Mater.* 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.195.
- [33] American Society for Testing and Materials., Ed., Standard test methods for fire tests of building construction and materials. West Conshohocken (PA): ASTM E119. 2012.
- [34] Chowdhury EU, PhD thesis: Behaviour of fibre reinforced polymer confined reinforced concrete columns under fire condition. 2009.
- [35] Kodur VKR, L. Bisby A, Green MF. Experimental evaluation of the fire behaviour of insulated fibre-reinforced-polymer-strengthened reinforced concrete columns. *Fire Saf. J.* 2006. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.05.004.
- [36] Chowdhury E, Bisby L, Green M, Bénichou N, Kodur V. Heat transfer and structural response modelling of FRP confined rectangular concrete columns in fire,” *Constr. Build. Mater.* 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.064.
- [37] Cree D, Chowdhury EU, Green MF, Bisby LA, and N. Bénichou N. Performance in fire of FRP-strengthened and insulated reinforced concrete columns. *Fire Saf. J.* 2012. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.08.006.
- [38] Bisby LA, PhD thesis: Fire behaviour of fibre-reinforced polymer (FRP) reinforced or confined concrete. 2003.
- [39] Turkowski P, Łukowski M, Sulik P, Roszkowski P. Fire resistance of CFRP-strengthened reinforced concrete beams under various load levels. *Procedia Eng.* 2017. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.137.
- [40] Zhang HY, Hao X, Fan W. Experimental study on high temperature properties of carbon fiber sheets strengthened concrete cylinders using geopolymer as adhesive. *Procedia Eng.* 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.01.078.
- [41] El-Gamal S, Al-Jabri K, Al-Mahri A, Al-Mahrrouqi S. Effects of elevated temperatures on the compressive strength capacity of concrete cylinders confined with FRP sheets: an experimental investigation. *Int. J. Polym. Sci.* 2015. DOI: 10.1155/2015/549187.
- [42] Tulendinov T, Zesers A, Tamužs V. Behavior of concrete cylinders strengthened with a basalt-FRP and subjected to mechanical loads and elevated temperatures. *Mech. Compos. Mater.* 2017. DOI: 10.1007/s11029-017-9676-6.

- [43] Mostefa AH, Ghernouti Y, Sebaibi Y., „Effectiveness of cement and plaster layers in protection of FRP confined concrete exposed to high temperatures. *J. Adhes. Sci. Technol.* 2015. DOI: 10.1080/01694243.2015.1005860.
- [44] Gawil B, Wu HC, Elarbi A. Modeling the behavior of CFRP strengthened concrete beams and columns at different temperatures. *Fibers*. DOI: 10.3390/fib8020010.
- [45] Abulgasem Mohamed Elarbi, PhD thesis: Durability performance of FRP strengthened concrete beams and columns exposed to hygrothermal environment. Wayne State University, Detroit, MI, USA, 2011. [Online]. Available: [http://digitalcommons.wayne.edu/do/search/?q=Durability performance of FRP strengthened concrete beams and columns exposed to hygrothermal environment&start=0&context=1397974&facet=](http://digitalcommons.wayne.edu/do/search/?q=Durability+performance+of+frp+strengthened+concrete+beams+and+columns+exposed+to+hygrothermal+environment&start=0&context=1397974&facet=)
- [46] Al-Salloum YA, Almusallam TH, Elsanadedy HM, Iqbal RA. Effect of elevated temperature environments on the residual axial capacity of RC columns strengthened with different techniques. *Constr. Build. Mater.* 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.041.
- [47] American Concrete Institute, Ed., ACI 440.2R-08, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. 2008.
- [48] Wardaya DAS, Sugiharto H, Pudjisuryadi P. Compressive strength of post fire exposed concrete column wrapped with fiber reinforced polymer. *Civ. Eng. Dimens.* 2017. DOI: 10.9744/ced.19.2.105-110.
- [49] El-Mahdy O, Hamdy G, Hisham M. „Nonlinear finite element analysis of insulated FRP strengthened reinforced concrete columns subjected to fire, *Stavební Obz. – Civ. Eng. J.* 2018. DOI: 10.14311/cej.2018.02.0016.
- [50] Chowdhury EU, Bisby LA, Green MF. Investigation of Insulated FRP-Wrapped Reinforced Concrete Columns in Fire. *Fire Saf. J.* 2007; vol. 42, pp. 452–460.
- [51] Kodur VKR, Bhatt PP. A numerical approach for modeling response of fiber reinforced polymer strengthened concrete slabs exposed to fire. *Compos. Struct.* 2017, pp. 226–240, 2018. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.12.051.
- [52] Blontrock H, Taerwe L, Vandeveld P. A numerical approach for modeling response of fiber reinforced polymer strengthened concrete slabs exposed to fire. *FRPRCS-5 Fiber-Reinforced Plast Reinf. Concr. Struct.* 2001; pp. 547–56.
- [53] Carlos TB, Rodrigues JPC, de Lima RCA, Dhima D. Experimental analysis on flexural behaviour of RC beams strengthened with CFRP laminates and under fire conditions. *Compos. Struct.* 2018. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.01.094.
- [54] Dong K, Hu K, Gao W. Fire behavior of full-scale CFRP-strengthened RC beams protected with different insulation systems. *J. Asian Archit. Build. Eng.* 2016. DOI: 10.3130/jaabe.15.581.
- [55] Firmo JP, Correia JR. Fire behaviour of thermally insulated RC beams strengthened with EBR-CFRP strips: Experimental study. *Compos. Struct.* 2015. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.11.063.
- [56] Zhang HY, Lv HR, Kodur V, Qi SL. Comparative fire behavior of geopolymer and epoxy resin bonded fiber sheet strengthened RC beams. *Eng. Struct.* 2018. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.11.027.
- [57] Blontrock H, Taerwe L, Vandeveld P. „Fire tests on concrete beams strengthened with fiber composite laminates, in October 5th-7th In proceedings of the international PhD symposium in civil engineering. Vienna, Austria: Konrad Bergmeister, 2000, pp. 151–161.
- [58] Gao WY, Hu K, Lu Z. Fire resistance experiments of insulated CFRP strengthened reinforced concrete beams. *Tumu Gongcheng Xuebao/China Civ. Eng. J.* 2010; vol. 43 (3).
- [59] Kodur VKR, Bhatt PP, Naser MZ. High temperature properties of fiber reinforced polymers and fire insulation for fire resistance modeling of strengthened concrete structures. *Compos. Part B Eng.* 2019. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107104.
- [60] Williams B, Kodur V, Green MF, Bisby L. Fire endurance of fiber-reinforced polymer strengthened concrete T-Beam. *ACI Struct. J.* 2008. DOI: 10.14359/19069.
- [61] Hawileh RA, Naser M, Zaidan W, Rasheed HA. Modeling of insulated CFRP-strengthened reinforced concrete T-beam exposed to fire. *Eng. Struct.* 2009; vol. 31, no. 12, pp. 3072–3079.
- [62] El-Mahdy O, Hamdy G, Abdullah M. Numerical investigation of FRP-strengthened reinforced concrete beams at high temperatures. *Stavební Obz. – Civ. Eng. J.* 2019. DOI: 10.14311/cej.2019.02.0018.
- [63] El-Mahdy O, Hamdy G, Abdullah M. Numerical investigation of the performance of insulated FRP-strengthened reinforced concrete beams in fire, *Stavební Obz. – Civ. Eng.* 2018. DOI: 10.14311/cej.2018.04.0046.
- [64] Naser M, Abu-Lebdeh G, Hawileh R. Analysis of RC T-beams strengthened with CFRP plates under fire loading using ANN. *Constr. Build. Mater.* 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.001.
- [65] Behnam B, Ronagh HR, Lim PJ. Numerical evaluation of the post-earthquake fire resistance of CFRP-strengthened reinforced concrete joints based on experimental observations. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 2016. DOI: 10.1080/19648189.2015.1018448.
- [66] Turkowski P. Fire Resistance of Fire-Protected Reinforced Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded Reinforcement Carbon Fibre-Reinforced Polymers at the Full Utilisation Degree. *Materials (Basel)*. 2023. DOI: 10.3390/ma16155234.
- [67] Silva P, Escusa G, Azenha M. Experimental investigation of RC slabs strengthened with NSM CFRP system subjected to elevated temperatures up to 80°C, in the 8th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering, Hong Kong, 2016, pp. 936–942.
- [68] Metwally M, Abou-Zeid M. Impact of elevated temperature, chemical and workmanship on performance of beams with Near Surface Mounted FRP bars, in CSCE Annual Conference Growing, Laval (Greater Montreal), 2019.
- [69] Del Prete I, Bilotta A, Bisby L, Nigro E. High TG FRP & cementitious adhesive, Potential benefits in fire for NSM FRP strengthened reinforced concrete beams. *Appl. Struct. Fire Eng.* 2016.
- [70] Del I, Bilotta A, Bisby L, Nigro E. Elevated temperature response of RC beams strengthened with NSM FRP bars bonded with cementitious grout. *Compos. Struct.*, vol. 258, no. September 2020, p. 113182, 2021. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113182.
- [71] Truong GT, Lee HH, Choi KK. Flexural behavior of RC beams strengthened with NSM GFRP strips after exposed to high temperatures. *Eng. Struct.* 2017, pp. 203–215, 2018. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.110.
- [72] Baena M, Jahani Y, Torres L, Barris C, Perera R. Flexural Performance and End Debonding Prediction of NSM Carbon FRP-Strengthened Reinforced Concrete Beams under Different Service Temperatures. *Polymers (Basel)*. 2023. DOI: 10.3390/polym15040851.
- [73] ISO 834-1:1999 Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements.
- [74] Firmo JP, Correia JR. Fire behaviour of thermally insulated RC beams strengthened with NSM-CFRP strips: Experimental study. *Compos. Part B Eng.* 2015. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.02.018.
- [75] Firmo, JP, Arruda MRT, Correia JR, Rosa IC. Three-dimensional finite element modelling of the fire behaviour of insulated RC beams strengthened with EBR and NSM CFRP strips. *Compos. Struct.* 2018. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.01.082.
- [76] Firmo JP, Arruda MRT, Correia JR. Contribution to the understanding of the mechanical behaviour of CFRP-strengthened RC beams subjected to fire: Experimental and numerical assessment. *Compos. Part B Eng.* 2018. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.04.007.
- [77] Firmo JP, Arruda MRT, Correia JR, Tiago C. Flexural behaviour of partially bonded carbon fibre reinforced polymers strengthened concrete beams: Application to fire protection systems design. *Mater. Des.* 2015. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.10.053.
- [78] Assad M, Hawileh RA, Abdalla JA. Modeling the behavior of CFRP-strengthened RC slabs under fire exposure. *Procedia Struct. Integr.* 2022. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.12.210.
- [79] Azevedo AS, Firmo JP, Correia JR, Chastre C, Biscaia H, Franco N. Fire behaviour of CFRP-strengthened RC slabs using different techniques – EBR, NSM and CREAtE. *Compos. Part B Eng.* 2021, p. 109471, 2022. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109471.