

# Wpływ podwyższonej temperatury na zachowanie elementów zginanych zbrojonych prętami FRP

## *The influence of elevated temperatures on the behavior of bent elements reinforced with FRP bars*

DOI: 10.15199/33.2020.05.05

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych belek pełnowymiarowych zbrojonych różnego rodzaju zbrojeniem FRP: (i) zbrojenie na bazie włókien bazaltowych BFRP (Basalt FRP); (ii) hybrydowe zbrojenie HFRP (Hybrid FRP) z włóknami węglowymi i bazaltowymi oraz (iii) nano-hybrydowe pręty nHFRP (nano-Hybrid FRP) ze zmodyfikowaną żywicą epoksydową. Sprawdzenie odporności ogniowej przeprowadzono wg scenariusza pożaru umownego zgodnie z krzywą standardową ISO-834 – elementy były poddane obciążeniu (zginaniu 4-punktowemu) i jednocześnie podgrzaniu z trzech stron (z boków oraz od strony dolnej). Wyniki wskazały, że wysoka temperatura ma istotny wpływ na nośność elementów (zmniejszenie nośności średnio o ok. 40%) oraz na sposób ich zniszczenia. Belka zbrojona prętami BFRP wykazała najlepsze wyniki – zniszczenie próbek nastąpiło po 97 min, maksymalne ugięcie wyniosło 16 cm, a temperatura mierzona na spodzie belki ok. 940°C i ok. 600°C na prętach. Odporność ogniowa elementów zbrojonych prętami FRP różniła się w zależności od rodzaju zastosowanego zbrojenia.

**Słowa kluczowe:** zbrojenie FRP; pręty kompozytowe; BFRP; HFRP; odporność ogniowa FRP.

**Abstract.** This paper describes the results of experimental studies for full-size beams reinforced with various types of FRP reinforcement: (i) Basalt – FRP (BFRP), (ii) Hybrid – FRP (HFRP) with carbon and basalt fibers, and (iii) nano-Hybrid-FRP (nHFRP) with modified epoxy resin. The fire resistance was checked in accordance with the contractual fire scenario based on the ISO-834 standard curve – the elements were subjected to loading (4-point bending) and at the same time heating of three edges (from the sides and from the bottom). The results showed that the temperature has a significant impact on the load-bearing capacity of the elements (the strength capacity was reduced by approximately 40%) and on the method of their destruction. The beam reinforced with BFRP bars showed the best results, destruction of the sample occurred after 97 minutes, maximum deflection - 16 cm, and the temperature measured on the bottom of the beam reached 940°C and about 600°C on the bars. The fire resistance of FRP reinforced elements was varying and depends on the type of reinforcement used.

**Keywords:** FRP reinforcement; composite bars; HFRP; BFRP; fire resistance of FRP.

**T**rwałość konstrukcji żelbetonowych związana jest z odpornością betonu i zbrojenia na działanie warunków środowiska. Jednym z mechanizmów niszczenia żelbetu jest korozja prętów stalowych, m.in. z powodu karbonatyzacji otuliny betonowej. Aby uniknąć niekorzystnych skutków spowodowanych tym zjawiskiem, zamiast typowych rozwiązań, takich jak wykorzystanie odpowiedniej klasy betonu, zapewnienie otuliny o odpowiedniej grubości lub użycie powłok ochronnych do betonu, można zastosować materiały o zwiększonej odporności na korozję [3]. Pręty kompozytowe na bazie FRP (Fibre Reinforced Polymers) mogą być alternatywnym rozwiązaniem

w stosunku do konwencjonalnego zbrojenia stalowego, a także zwiększyć nośność konstrukcji [1].

Powszechne stosowanie zbrojenia na bazie FRP w konstrukcjach betonowych ogranicza podwyższona temperatura, dlatego też zbadano, jak zmieniają się właściwości mechaniczne elementów podczas i po zakończeniu ekspozycji na taką temperaturę.

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych belek pełnowymiarowych narażonych na wysoką temperaturę. Zastosowano różne rodzaje prętów w strefie rozciągania: i – zbrojenie na bazie włókien bazaltowych BFRP (Basalt FRP); ii – hybrydowe zbrojenie z włóknami węglowymi i bazaltowymi HFRP (Hybrid FRP) oraz iii – hybrydowe zbrojenie ze zmodyfikowaną żywicą epoksydową nHFRP (nano-Hybrid FRP).

### Badane elementy

Do badań przygotowano 6 belek o przekroju prostokątnym  $b \times h = 140 \times 280$  mm i długości 3200 mm. Wszystkie elementy zostały wykonane z tej samej mieszanki betonowej (klasa wytrzymałości betonu C40/45). Belki były zbrojone wyłącznie prętami FRP. Zbrojenie główne części górnej wykonano z dwóch prętów BFRP o średnicy 8 mm, a zbrojenie poprzeczne (strzemiona) z prętów BFRP o średnicy 6 mm oraz rozstawie 100 mm i zostało ono odpowiednio zagięte w fazie produkcji. Zbrojenie główne w strefie rozciągania wykonano z dwóch prętów o średnicy 14 mm. Badaniom poddano po dwie próbki zbrojone prętami BFRP, HFRP oraz nHFRP. Właściwości mechaniczne użytych prętów (zbądane eksperymentalnie) przedstawiono w tabeli 1 [3]. Otulina nomi-

<sup>1)</sup> Politechnika Warszawska; Wydział Inżynierii Łądowej; k.protchenko@il.pw.edu.pl

nalna ze wszystkich stron wynosiła  $C_{nom} = 30$  mm.

Badania w wysokiej temperaturze, przy jednoczesnym obciążeniu, przeprowadzono na trzech belkach, po jednej z każdym rodzajem prętów. Natomiast trzy pozostałe belki były użyte jako referencyjne (zastosowano tylko obciążenie, aby określić nośność i mechanizm zniszczenia belek). Opis elementów przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 1. Właściwości mechaniczne prętów zastosowanych jako zbrojenie**

Table 1. Mechanical characteristics of utilized bars

Rodzaj zbrojenia	Największa średnia siła zrywająca $F_u$ [kN]	Średnia wytrzymałość na rozciąganie $f_u$ [MPa]	Wydłużenie względne przy zerwaniu $\epsilon_u$ [%]	Moduł Young'a $E_1$ [GPa]
BFRP $\phi 6$	37,07	1148,81	2,48	46,47
BFRP $\phi 8$	60,03	1103,30	2,52	43,87
BFRP $\phi 14$	179,26	1101,94	2,39	46,02
HFRP $\phi 14$	206,57	1160,06	1,61	72,12
nHFRP $\phi 14$	150,54	958,00	1,58	60,44

**Tabela 2. Opis elementów badanych w wysokiej temperaturze**

Table 2. Descriptions of the samples tested in elevated temperatures

Oznaczenie elementu	Stopień zbrojenia [%]	Zbrojenie (strefa rozciągania) [liczba/średnica/rodzaj]	Moment niszczący (określony z elementów referencyjnych) [kNm]
B2 $\phi$ 14		2/14/BFRP	70
H2 $\phi$ 14	1,13	2/14/HFRP	85
N2 $\phi$ 14		2/14/nHFRP	81

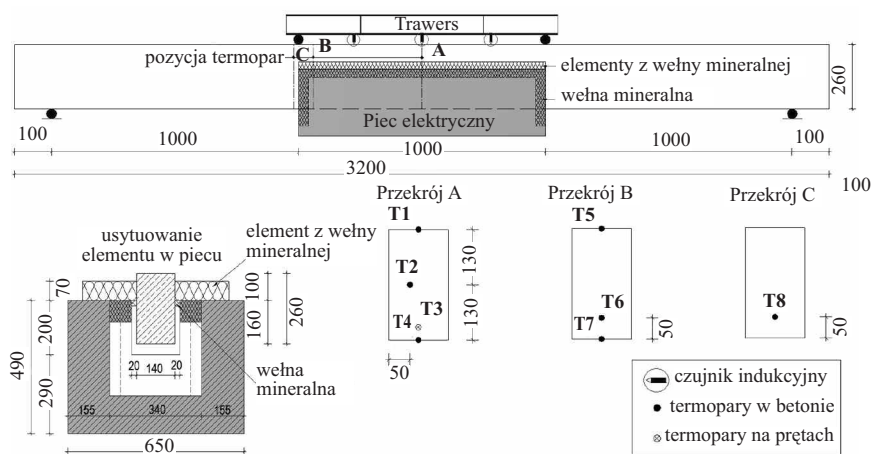
### Badania laboratoryjne

Badania belek narażonych na wysoką temperaturę przeprowadzono wg scenariusza pożaru umownego zgodnie z krzywą standardową ISO-834 [4]. Podgrzewana była część środkowa elementów (z boków oraz od strony dolnej), przy jednoczesnym zastosowaniu obciążenia stanowiącego 50% momentu niszczącego, określonego na identycznych belkach referencyjnych. Przyjęto schemat statyczny elementu swobodnie podpieranego obciążonego dwiema siłami skupionymi, usytuowanymi w 1/3 i 2/3 rozpiętości elementu.

Podczas badań dokonywano pomiaru ugięcia za pomocą trzech czujników indukcyjnych. Przed betonowaniem zainstalowano termopary płaszczonego typu K (do 1100°C) wewnątrz badanych belek, w wybranych miejscach przekroju, w celu monitorowania temperatury prętów i betonu podczas oddziaływania wysokiej temperatury. W każdej belce znajdowało się 8 termopar. Rozmieszczono je w środku rozpiętości elementu, a także w dwóch przekrojach w pobliżu krawędzi pieca (wewnątrz i na zewnątrz pieca), co pozwoliło na określenie zmiany temperatury wzdłuż ogrzewanego odcinka na całej wysokości belki. Stanowisko badawcze oraz usytuowanie czujników i termopar przedstawiono na rysunku 1, a na fotografii przykładowy badany element.

zmiażdżenie betonu w strefie ściskanej, natomiast belka zbrojona BFRP uległa zniszczeniu na skutek zerwania zbrojenia rozciąganego. Najlepsze wyniki podczas badań uzyskano w przypadku belki ze zbrojeniem BFRP (zniszczenie próbki nastąpiło po 97 min), a temperatura mierzona na spodzie belki wyniosła 940°C i ok. 600°C na prętach. Przykładowy rozkład temperatury na trzech przekrojach belki B2 $\phi$ 14 pokazano na rysunku 2.

Pomiar ugięć przeprowadzono w środku rozpiętości belek. Czujniki były przyłożone do górnej krawędzi elementów. Maksymalne uzyskane ugięcie belki B2 $\phi$ 14 wyniosło 16 cm, a w przypadku belek hybrydowych wartość ugięcia była zbliżona i osiągnęła ok. 7 cm. Zależność „ugięcie – czas ogrzewania” przedstawiono na rysunku 3.



**Rys. 1. Stanowisko badawcze**

Fig. 1. The test stand



**Usytuowanie belki w piecu podczas badań**

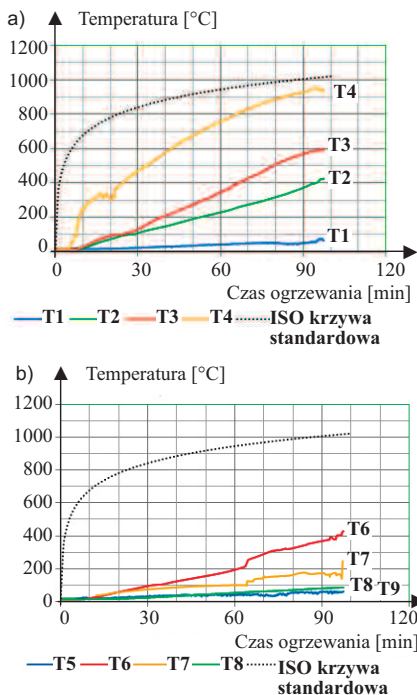
Placing of the beam inside the furnace

### Wyniki badań

Belki ze zbrojeniem hybrydowym (H2 $\phi$ 14 i N2 $\phi$ 14) oraz wszystkie belki referencyjne zostały zniszczone przez

### Podsumowanie

Wyniki przedstawione w artykule oraz inne badania, które przeprowadziłem, wskazują, że mechanizm utraty nośności



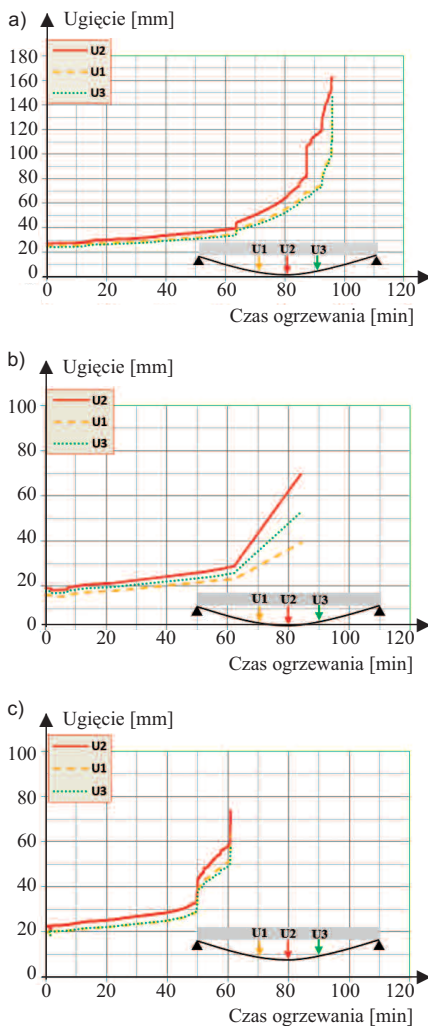
**Rys. 2. Rozkład temperatury w belce B2ø14: a) przekrój A; b) przekroje B i C**  
 Fig. 2. Temperature distribution in the beam B2ø14: a) section A; b) sections B and C

elementów zginanych w warunkach pożarowych zależy od rodzaju zastosowanego zbrojenia rozciąganego. Belki zbrojone prętami BFRP ulegały awarii w strefie rozciągania, a utrata nośności belek zbrojonych prętami HFRP następowała na skutek skruszenia betonu w strefie ściskanej. Najlepsze wyniki uzyskano w przypadku belki zbrojonej BFRP, co może świadczyć o tym, że pręty na bazie włókien bazaltowych mają lepszą odporność niż pręty z częściową substytucją włókien.

**Literatura**

[1] Garbacz Andrzej, Marek Urbański, Andrzej Łapko. 2015. „BFRP Bars as an Alternative Reinforcement of Concrete Structures – Compatibility and Adhesion Issues.” *Advanced Materials Research*, 1129: 233 – 241. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1129.233.

[2] Garbacz Andrzej, Elżbieta Danuta Szmigiera, Kostiantyn Protchenko, Marek Urbański. 2018. „On Mechanical Characteristics of HFRP Bars with Various Types of Hybridization, 653 – 658. International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC 2018). DOI: 10.1007/978-3-319-78175-4\_83.



**Rys. 3. Ugięcie badanych belek w zależności od czasu ogrzewania: a) B2ø14; b) H2ø14; c) N2ø14**  
 Fig. 3. The deflections of the beams depending on heating time: a) B2ø14; b) H2ø14; c) N2ø14

[3] Protchenko Kostiantyn, Joanna Dobosz, Marek Urbański, Andrzej Garbacz. 2016. „Wpływ substytucji włókien bazaltowych przez włókna węglowe na właściwości mechaniczne prętów B/CFRP (HFRP).” *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, JCEEA*, 63 (1/1): 149 – 156.

[4] Szmigiera Elżbieta Danuta, Kostiantyn Protchenko, Marek Urbański, Andrzej Garbacz. 2019. „Mechanical Properties of Hybrid FRP Bars and Nano-Hybrid FRP Bars.” *Archives of Civil Engineering*, 65 (1): 97 – 110. DOI: 10.2478/ace-2019-0007.

Przyjęto do druku: 17.03.2020 r.



**SODASIL – TiO<sub>2</sub> Extender**

– lepsze krycie, wzrost stopnia białości,  
 – obniżenie kosztów produkcji dzięki zmniejszeniu udziału TiO<sub>2</sub>



**Rettenmaier Polska**  
 Sp. z o.o.  
 Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B  
 02-366 Warszawa  
 mobile +48 600 423 423  
 Tel + 48 22 608 51 00  
 e-mail: arbofel@jrs.pl

**Polecamy prenumeratę miesięcznika „Materiały Budowlane” w wersji papierowej i online**