



ODPORNOŚĆ OGNIOWA BELEK ŻELBETOWYCH WZMOCNIONYCH CFRP, ZABEZPIECZONYCH I NIEZABEZPIECZONYCH OGNIOCHRONNIE

PIOTR TURKOWSKI, *p.turkowski@itb.pl*

Zakład Badań Ogniwych, Instytut Techniki Budowlanej

Streszczenie: Przedstawiono algorytm projektowania i doboru zabezpieczenia ogniochronnego belek żelbetowych wzmocnionych doklejającymi taśmami z włókien węglowych. Przedstawiono wyniki badań odporności ogniowej belek żelbetowych niezabezpieczonych i zabezpieczonych ogniochronnie przy różnych stopniach wykorzystania nośności, w tym na elementach wzmocnionych CFRP pod obciążeniem przekraczającym rzeczywistą nośność na zginanie elementu przed wzmocnieniem.

Słowa kluczowe: odporność ogniowa, konstrukcje żelbetowe, CFRP, izolacje ogniochronne.

1. Wprowadzenie

Doklejane taśmy z włókien węglowych (CFRP), to jeden z najszybszych i najłatwiejszych sposobów wzmacniania konstrukcji żelbetowych. Stosuje się je coraz częściej, z różnych przyczyn – błędów projektowych, błędów wykonawczych, czy z uwagi na zmianę sposobu użytkowania. Niekiedy taśmy CFRP służą jedynie jako wzmocnienie strefy wokół nieprzewidywanych wcześniej otworów w stropach, z uwagi na możliwe zarysowanie. Ich znaczenia w sytuacji pożarowej nie jest istotne. W przypadkach jednak, kiedy rolą wzmocnień jest przenoszenie obciążeń w trwałej sytuacji obliczeniowej, spełnienie wymagań w zakresie odporności ogniowej, może wiązać się z koniecznością stosowania zabezpieczeń ogniochronnych.

W związku z rosnącą liczbą zapytań kierowanych do Instytutu Techniki Budowlanej, przez projektantów, wykonawców, rzeczoznawców ds. zabezpieczeń przeciwpożarowych i samych producentów systemów izolacji ogniochronnych, w Laboratorium Badań Ogniwych, w listopadzie 2012 r., opracowano procedurę badawczą skuteczności zabezpieczeń ogniochronnych wzmocnień CFRP – PB LP-054/1/11-2012 [8]. Wyniki badań przeprowadzonych na jej podstawie pozwoliły na wydanie pierwszej kompleksowej oceny w zakresie odporności ogniowej wzmacnianych ścian, stropów, słupów i belek żelbetowych, oraz pozwoliły na sformułowanie założeń do opracowania metody obliczeniowej wyznaczania grubości izolacji ogniochronnej tych elementów.

W prowadzonych dotychczas badaniach elementów żelbetowych wzmacnianych CFRP, zarówno w Europie jak i na świecie [4, 5, 6, 7], obciążenie elementów próbnych było co najwyżej równe nośności charakterystycznej elementu przed wzmocnieniem. W związku z powyższym, w ramach projektu badawczego NP-99/2014-2015, prowadzonego w Zakładzie Badań Ogniwych Instytutu Techniki Budowlanej opracowano program badawczy belek żelbetowych wzmocnionych CFRP, zabezpieczonych i niezabezpieczonych ogniochronnie [1], uwzględniający przypadki obciążeń przekraczających rzeczywistą nośność belek przed wzmocnieniem, którego pierwsze wyniki opisano w dalszej części.

2. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe

Projektowanie belek żelbetowych wzmocnionych doklejanymi taśmami z włókien węglowych z uwagi na warunki pożarowe w pierwszej kolejności skupia się na ustaleniu wartości obciążeń w wyjątkowej sytuacji obliczeniowej $E_{d,fi}$ zgodnie z PN-EN 1990 [9]. Następnie wykorzystując charakterystyczne mechaniczne właściwości materiałowe wyznacza się obliczeniową nośność belki żelbetowej w warunkach pożarowych $R_{d,0,fi,RC}$, w chwili $t = 0$ pożaru, przed wzmocnieniem taśmami z włókien węglowych.

Alternatywnie, obliczenia można prowadzić posługując się obliczeniową nośnością belki żelbetowej $R_{d,RC}$, przed wzmocnieniem taśmami z włókien węglowych, w warunkach normalnych.

Porównanie wartości oddziaływań i nośności określa się warunki brzegowe doboru izolacji ogniochronnej wg następujących przypadków:

1. $E_{d,fi} \leq 0,60 R_{d,0,fi,RC}$ lub $E_{d,fi} \leq 0,70 R_{d,RC}$ – odporność ogniową belki można wyznaczyć korzystając z danych tabelarycznych lub innych metod obliczeniowych podanych w PN-EN 1992-1-2 [12], a grubość ewentualnej izolacji ogniochronnej wyznaczać bezpośrednio z tablic podanych w aprobatkach technicznych systemów ogniochronnych, przyjmując temperaturę krytyczną zbrojenia $\theta_{cr} \geq 500^{\circ}\text{C}$,
2. $0,60 R_{d,0,fi,RC} < E_{d,fi} \leq R_{d,0,fi,RC}$ lub $0,70 R_{d,RC} < E_{d,fi} \leq 1,15 R_{d,RC}$ – odporności ogniowej belki nie można ustalać na podstawie danych tabelarycznych podanych w PN-EN 1992-1-2 [12], lecz korzystając z uproszczonych metod obliczeniowych np. metody izotermi 500°C , a grubość ewentualnej izolacji ogniochronnej można wyznaczać z tablic podanych w aprobatkach technicznych systemów ogniochronnych, przyjmując temperaturę krytyczną zbrojenia $350^{\circ}\text{C} \leq \theta_{cr} < 500^{\circ}\text{C}$,
3. $R_{d,0,fi,RC} < E_{d,fi}$ lub $1,15 R_{d,RC} < E_{d,fi}$ – wzmocnienie CFRP jest wymagane w sytuacji pożarowej i konieczne jest zastosowanie izolacji ogniochronnej, z uwagi na temperaturę szklenia kleju taśmy węglowej T_g wynoszącą przeważnie od 50°C do 115°C na powierzchni wzmocnianego elementu żelbetowego, ustalonej na podstawie deklaracji producenta lub badań; przy aktualnym stanie wiedzy, grubość izolacji ogniochronnej można wyznaczać w tylko w badaniach odporności ogniowej lub na podstawie zwalidowanym modeli numerycznych.

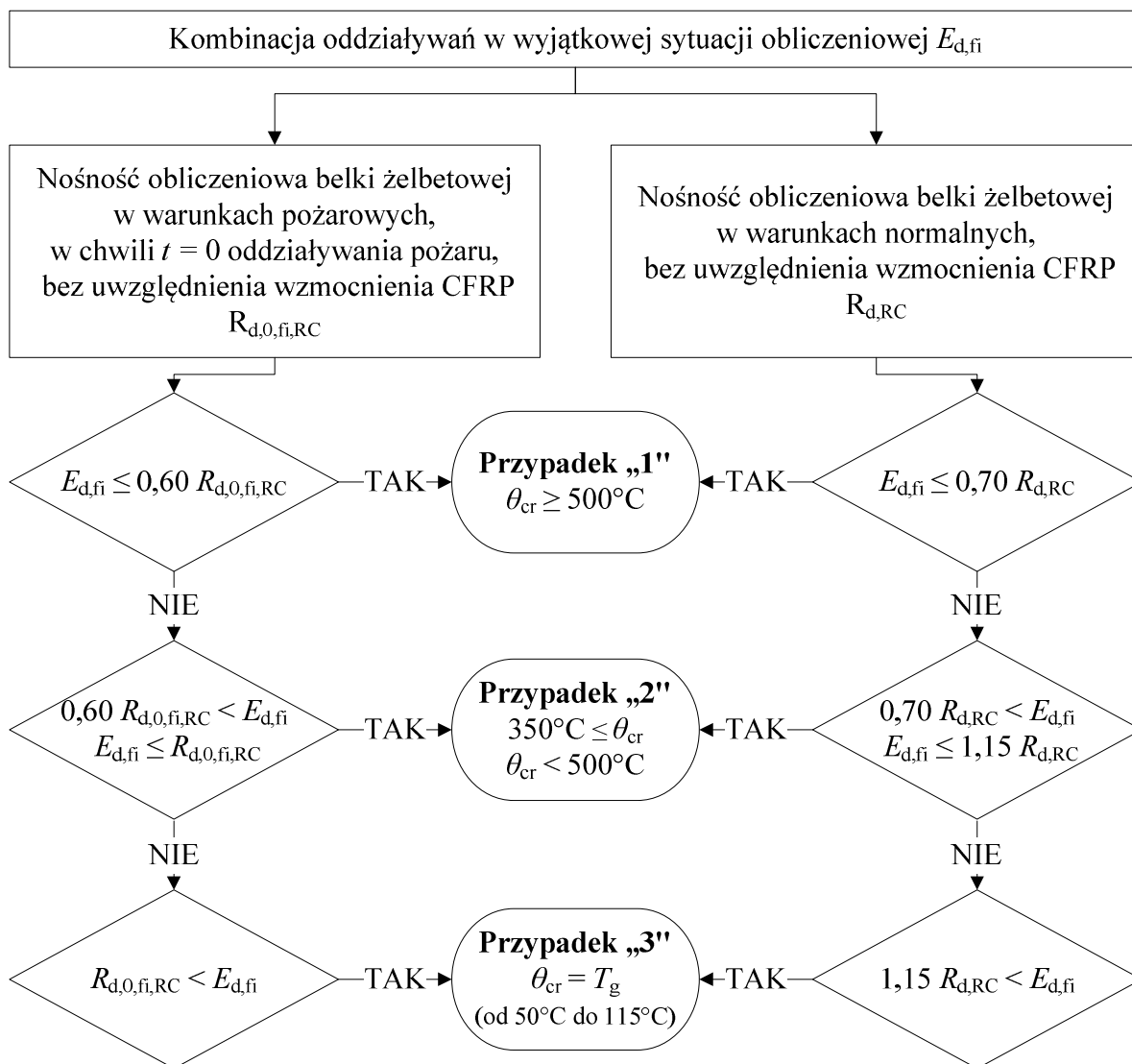
Uproszczony schemat blokowy przedstawiony w pracy [2], uzupełniony o weryfikację w sytuacji normalnej i uszczegółowiony w zakresie wyżej opisanych przypadków przedstawiono na rysunku 1.

Przykłady obliczania nośności w warunkach pożarowych oraz dodatkowe zalecenia przy projektowaniu konstrukcji żelbetowych z uwagi na warunki pożarowe można znaleźć również w pracy [3].

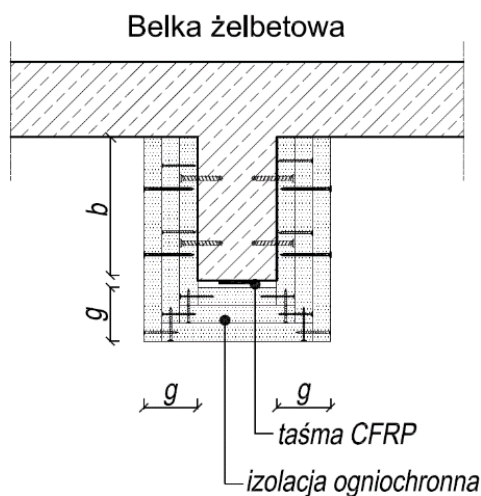
3. Systemy zabezpieczeń ogniochronnych

Na podstawie opracowanej w Instytucie Techniki Budowlanej Procedury badawczej PB LP-054/1/11-2012 [8], przeprowadzono badanie ogniowe skuteczności płyt ogniochronnych, przeznaczonych do zabezpieczania taśm i mat z włókien węglowych klejonych do konstrukcji żelbetowych, przy oddziaływaniu pożaru standardowego.

W tab. 1 zamieszczono fragmenty wyników oceny tego systemu, w odniesieniu dla belek. Objasnienia do danych podano na rysunku 2.



Rys. 1. Schemat blokowy ustalania warunków brzegowych doboru izolacji ogniochronnej, opis w tekście (na podstawie Sulik P., Turkowski P. [2])



Rys. 2. Wymiary grubości g i szerokości zakładu bocznego b izolacji ogniochronnej belek żelbetowych wzmocnionych CFRP

Tabela 1. Wymagane grubości izolacji ogniochronnej belek żelbetowych wzmocnionych CFRP w zależności od temperatury szklenia kleju i klasy odporności ogniowej

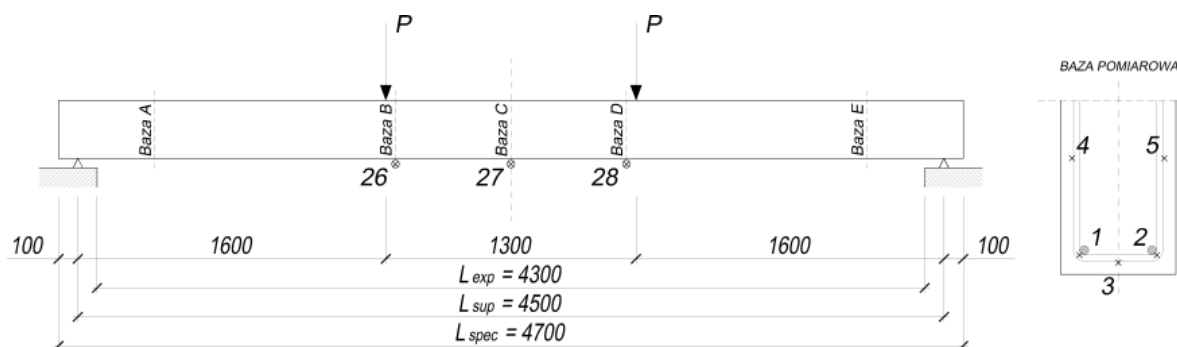
Klasa odporności ogniowej	Wymagana grubość g [mm] / szerokość zakładu bocznego b [mm] izolacji ogniochronnej na belkach żelbetowych dla zadanej temperatury szklenia kleju T_g [°C]					
	50°C do 59°C	60°C do 69°C	70°C do 59°C	80°C do 59°C	90°C do 59°C	≥100°C
R 30	50/100	40/100	40/100	25/100	25/100	25/100
R 60	75/150	75/100	50/100	50/100	50/100	40/100
R 90	100/200	100/150	75/150	75/150	75/150	50/150
R 120	150/250	125/250	100/200	100/200	100/200	75/200
R 180	–	–	–	150/250	150/250	150/250
R 240	–	–	–	–	–	175/300

4. Badania odporności ogniowej

Badania odporności ogniowej 6 belek żelbetowych wzmocnionych doklejającymi taśmami z włókien węglowych, zabezpieczonych i niezabezpieczonych ogniochronnie przeprowadzono w Laboratorium Badań Ogniowych Instytutu Techniki Budowlanej, w styczniu i lutym 2015 r., zgodnie z PN-EN 1365-3 [14], przy trójstronnym nagrzewaniu wg krzywej standardowej temperatura-czas zgodnie z PN-EN 1363-1 [13].

Belki o przekroju 450 mm x 150 mm (wysokość x szerokość) wykonano z betonu klasy C 16/20. Zbrojenie stanowiły 4 pręty #12 mm ze stali RB500W, po jednym w każdym narożniku oraz strzemiona dwucięte 8 mm co 20 cm, również ze stali RB500W.

Długość całkowita elementów próbnych wynosiła $L_{spec} = 4700$ mm, rozpiętość między podporami $L_{sup} = 4500$ mm, a długość poddana nagrzewaniu $L_{exp} = 4300$ mm (por. rys. 3). Belki obciążano dwiema siłami P w rozstawie 1,30 m.



Rys. 3. Dane geometryczne elementów próbnych i miejsca pomiaru temperatury

Na górnej powierzchni belek ułożono bloki z betonu komórkowego symulujące strop, zgodnie z wymaganiami normy badawczej PN-EN 1365-3 [14].

Wzmocnienia CFRP z taśm Sika Carbodur S512 o długości 4000 mm, szerokości 50 mm i grubości 1,2 mm, przyklejono, przed przyłożeniem obciążenia, na dolnej powierzchni belek w osi przekroju poprzecznego i w środku rozpiętości belek, klejem Sikadur-30, którego temperatura przejścia w szkliwo, zgodnie z kartą informacyjną [16], wynosi $T_g = 62^\circ\text{C}$.

Izolację ogniochronną wykonano z płyt Glasroc F (RIDURIT) w systemie Rigips 6.40.70 firmy Saint-Gobain Construction Products Polska Sp. z o.o.

Belki żelbetowe przed badaniem sezonowano w warunkach powietrzno-suchych przez ponad 90 dni oraz przez kolejne 28 dni po wykonaniu wzmocnień CFRP i izolacji ogniochronnej. Wilgotność betonu w czasie badań wynosiła od 4 do 5%.

Temperaturę elementu próbnego mierzono za pomocą 25 termometrów typu K, po 5 w każdej bazie, w lokalizacjach przedstawionych na rys. 3. Temperaturę styku powierzchni betonu i izolacji ogniochronnej lub kleju taśm węglowych mierzono za pomocą dodatkowych 3 termopar płaszczowych (oznaczenia 26, 27, 28). Temperaturę w piecu mierzono za pomocą 8 termometrów płytkowych zgodnych z normą PN-EN 1363-1 [13]. Ugięcie i szybkość narastania ugięcia mierzono w środku rozpiętości belek za pomocą czujników linkowych.

Zestawienie parametrów wytrzymałościowych elementów próbnych, obliczonych zgodnie z PN-EN 1992-1-1 [11] oraz w programie Sika Carbodur wersja 1.1.4.0, zestawiono w tab. 2.

Tabela 2. Parametry wytrzymałościowe elementów próbnych

Belki żelbetowe przed wzmocnieniem CFRP			Belki żelbetowe wzmocnione CFRP	
$M_{Rd,RC}$ [kNm]	$M_{Rd,0,fi}$ [kNm]	$M_{R,RC}^{1)}$ [kNm]	$M_{Rd,CFRP}$ [kNm]	$M_{R,CFRP}^{1)}$ [kNm]
36,8	43,8	55,0	71,1	81,0

¹⁾ rzeczywista nośność belek na zginanie ustalona w próbach wytrzymałościowych na zimno

Kryteria awarii belki przyjęto zgodnie z normą PN-EN 1363-1 [13], tj. jako czas osiągnięcia kryterium ugięcia granicznego D lub granicznej szybkości narastania ugięcia dD/dt . Z uwagi na duże ryzyko zawalenia się belek do komory pieca, w niektórych przypadkach badanie przerywano po osiągnięciu tylko jednego z kryteriów. Przyjęte podejście jest rozbieżne z normą klasyfikacyjną PN-EN 13501-2 [15], w której czas klasyfikacyjny określa się po osiągnięciu obu kryteriów, co oznacza to, że ustalone w ten sposób klasy odporności ogniowej byłyby wyższe aniżeli, to zrobiono. W praktyce, w odniesieniu do badanych elementów różnice te byłyby pomijalne, co widać na przykładzie belki B-5, gdzie po zerwaniu wzmocnienia, ugięcie belki gwałtownie przyspieszyło i różnica w czasie osiągnięcia obu kryteriów była mniejsza niż 15 sekund.

Za czas awarii izolacji ogniochronnej przyjęto czas odpadnięcia całej dolnej części izolacji, w wyniku którego następowało odsłonięcie dolnej powierzchni betonowej belki, a przyrost temperatury przekraczał 50 K/min.

Warto zwrócić uwagę na średnią temperaturę zbrojenia w belkach B-1, B-2 i B-3 w chwili awarii, która wynosiła ok. 500°C. Moment zginający w belkach był równy nośności obliczeniowej belek w warunkach pożarowych $M_{R,0,fi,RC}$, w której to sytuacji, zgodnie z PN-EN 1992-1-2 [12] oraz informacjami przedstawionymi w punkcie 2, temperatura krytyczna nie powinna wynosić około 350°C. Jak jednak wykazano w badaniach wytrzymałościowych, rzeczywista nośność na zginanie belki $M_{R,RC}$ wynosiła 55 kNm i w takim przypadku temperatura krytyczna odczytana z wykresu spadku wytrzymałości stali zbrojeniowej, podanego w PN-EN 1992-1-2 [12], wynosi 440°C.

W tabeli 3 przedstawiono wyniki badań wszystkich belek.

Tabela 3. Wyniki badań odporności ogniowej

Belka	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6
Wzmocnienie	Sika Carbodur S512	brak	Sika Carbodur S512	Sika Carbodur S512	Sika Carbodur S512	Sika Carbodur S512
Izolacja ogniochronna	brak	RIDURIT 50 mm	RIDURIT 50 mm	brak	RIDURIT 50 mm	RIDURIT 150 mm
Obciążenie w badaniu	44 kNm	44 kNm	44 kNm	68 kNm	68 kNm	68 kNm
Czas do awarii wzmocnienia	2,25 min	n/d	75,5 min	1,07 min	57 min	289,5 min
Czas do awarii izolacji	n/d	168 min	160 min	n/d	nie osiągnięto	nie osiągnięto
Czas osiągnięcia kryterium $dD/dt = 5 \text{ mm/min}$	53,25 min	212 min	211,5 min	1,07 min	57 min	289,5 min
Czas osiągnięcia kryterium $D = 112,5 \text{ mm}$	57,5 min	–	215 min	–	57,25 min	–
Przyjęty czas awarii belki	53,25 min	212 min	211,5 min	1,07 min	57 min	289,5 min
Temperatura zbrojenia w chwili awarii	509°C	514°C	481°C	17°C	66°C	63°C
Temperatura wzmocnienia w chwili awarii	196°C	n/d	83,1°C	70,4°C	77,1°C	68,9°C
Temperatura wzmocnienia / belki	/ 909°C	/ n/d	/ 1128°C	/ 70,4°C	/ 77,1°C	/ 68,9°C
Ugięcie początkowe belki obciążonej przed badaniem	10,5 mm	8,3 mm	8,0 mm	12,0 mm	14,2 mm	9,9 mm
Ugięcie $D^{1)}$ w chwili awarii izolacji / wzmocnienia	n/d / 0,2 mm	12,2 mm / n/d	6,1 mm / 0,5 mm	n/d / 0,3 mm	– / 4,0 mm	– / 12,5 mm

¹⁾ w chwili rozpoczęcia nagrzewania, wartość ugięcia jest zerowana

Widok elementów próbnych przedstawiono na rysunkach 4 do 7.



Rys. 4. Montaż izolacji ogniochronnej



Rys. 5. Stanowisko do badań



Rys. 6. Belka B-4 po badaniu



Rys. 7. Belka B-3 po badaniu

5. Wnioski i podsumowanie

Na podstawie wyników badań wyciągnięto następujące wnioski:

1. Przedstawiony w punkcie 2 algorytm wyznaczania temperatury krytycznej i doboru zabezpieczenia ogniochronnego, pozwala bezpiecznie oszacować warunki brzegowe jakie należy przyjąć przy projektowaniu belek żelbetowych wzmocnionych doklejającymi taśmami z włókien węglowych, z uwagi na warunki pożarowe.
2. We wszystkich badaniach belek żelbetowych wzmocnionych CFRP, przy obciążeniu przekraczającym rzeczywistą nośność na zginanie belki przed wzmocnieniem, kryteria nośności ogniowej osiągnięto natychmiast po odpadnięciu wzmocnień i przed odpadnięciem izolacji ogniochronnej.
3. W kolejnych etapach prac należy skupić się na opracowaniu i walidacji metody badawczej, i metody obliczeniowej szacowania grubości izolacji ogniochronnej z uwagi na temperaturę przejścia kleju w szkliwo T_g .

Referat przygotowany w ramach pracy badawczej NP-99/2015 realizowanej w Zakładzie Badań Ogniowych Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie.

Literatura

1. Turkowski P. Praca badawcza NP-99/2014. Badanie i ocena odporności ogniowej belek żelbetowych, wzmocnionych CFRP, zabezpieczonych i niezabezpieczonych ogniochronnie. Sprawozdanie z realizacji pracy w 2014 r. Instytut Techniki Budowlanej, 2014.
2. Sulik P., Turkowski P. Zabezpieczenia ogniochronne taśm i mat z włókien węglowych klejonych do konstrukcji żelbetowych. Materiały Budowlane nr 10/2014.
3. Woźniak G., Turkowski P. Projektowanie konstrukcji z betonu z uwagi na warunki pożarowe według Eurokodu 2. Instytut Techniki Budowlanej, 2013.
4. C. López, J. P. Firmo, C. Tiago, and J. R. Correia. Fire protection systems for reinforced concrete beams and slabs strengthened with CFRP laminates. CICE 2012, 13-15 czerwca 2012, Rzym, Włochy [materiały konferencyjne].
5. D. Cree, E.U. Chowdhury, M.F. Green, L.A. Bisby, N. Bénichou. Performance in fire of FRP-strengthened and insulated reinforced concrete columns. Fire Safety Journal no. 54(2012):86-95.
6. V.K.R. Kodur, L.A. Bisby, M.F. Green. Experimental evaluation of the fire behavior of insulated fibre-reinforced-polymer-strengthened reinforced concrete columns. Fire Safety Journal no. 41(2006): 547-557.
7. B. Williams, L. Bisby, V. Kodur, M. Green, E. Chowdhury. Fire insulation schemes for FRP-strengthened concrete slabs. Composites. Part A no. 37(2006):1151-1160.

8. Procedura badawcza PB LP-054/1/11-2012. Badania skuteczności ogniochronnej zabezpieczeń taśm stanowiących zewnętrzne doklejane zbrojenie elementów z betonu, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2012.
9. PN-EN 1990:2004. Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji.
10. PN-EN 1991-1-2:2006. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-2: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru.
11. PN-EN 1992-1-1:2008. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
12. PN-EN 1992-1-2:2008. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-2: Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.
13. PN-EN 1363-1:2012. Badania odporności ogniowej. Część 1: Wymagania ogólne.
14. PN-EN 1365-3:2002. Badania odporności ogniowej elementów nośnych. Część 3: Belki.
15. PN-EN 13501-2+A1:2010. Klasyfikacja ogniowa wyrobów budowlanych i elementów budynków. Część 2: Klasyfikacja na podstawie wyników badań odporności ogniowej, z wyłączeniem instalacji wentylacyjnej.
16. Karta informacyjna Sikadur-30, nr 02 02 06 04 001 0 000001 z 27.11.2014 r. Dostęp online: <http://pol.sika.com/dms/getredirect.get/plcon.webdms.sika.com/141>.

FIRE RESISTANCE OF CFRP-STRENGTHENED RC BEAMS, WITH AND WITHOUT FIRE PROTECTION

Abstract: An algorithm for determination of boundary conditions of fire protection on CFRP-strengthened reinforced concrete beams is given. Results on fire tests on RC beams, with and without fire protection, at various loadbearing capacity utilization factor are presented. Fire testing program included CFRP-strengthened RC beams loaded over the real loadbearing capacity of the elements before strengthening.

Keywords: fire resistance, reinforced concrete, CFRP, fire protection.