

Projektowanie zabezpieczeń ogniochronnych konstrukcji żelbetowych wzmocnionych zewnętrznym zbrojeniem doklejaniem z uwagi na warunki pożarowe

Piotr Turkowski¹

¹ *Zakład Badań Ogniowych, Instytut Techniki Budowlanej, e-mail: p.turkowski@itb.pl*

Streszczenie: Praca opisuje zagadnienia związane z projektowaniem żelbetowych konstrukcji wzmocnionych zewnętrznym zbrojeniem doklejaniem, z uwagi na warunki pożarowe. W pierwszej części przedstawiono schemat blokowy, na podstawie którego ustalić można, czy zabezpieczenie zbrojenia doklejanego jest potrzebne, czy też można je pominąć. W drugiej części pokazano, jak takie ewentualne zabezpieczenie ogniochronne powinno zostać wykonane. Ponadto przedstawiono procedurę badania i oceny skuteczności ogniochronnej zabezpieczeń taśm stanowiących zewnętrzne doklejane zbrojenie elementów żelbetowych, wdrożoną w Laboratorium Badań Ogniowych Instytutu Techniki Budowlanej.

Słowa kluczowe: konstrukcje żelbetowe, FRP, projektowanie na warunki pożarowe, systemy zabezpieczeń ogniochronnych.

1. Wprowadzenie

Zewnętrzne zbrojenie doklejane stosowane jest coraz powszechniej. Potrzeba ta najczęściej wynika ze zmiany sposobu użytkowania budynku, która może skutkować koniecznością uwzględnienia dodatkowych obciążeń, lub z powodu błędów wykonawczych bądź projektowych.

Zbrojenie FRP (ang. Fibre-Reinforced Plastic) to materiały kompozytowe z różnego rodzaju włóknami: szklanymi (GFRP – ang. Glass Fibre-Reinforced Plastic), węglowymi (CFRP – ang. Carbon Fibre-Reinforced Plastic), aramidowymi (AFRP – ang. Aramid Fibre-Reinforced Plastic). Włókna osadza się w matrycy żywicznej, która stanowi spoiwo i służy do przenoszenia obciążeń na te włókna. Kompozyty produkuje się w postaci taśm, zazwyczaj o szerokości od 50 do 100 mm albo mat. Wytrzymałość na rozciąganie kompozytów FRP sięga 1500 MPa, o wiele więcej w porównaniu do zwyczajnej miękkiej stali zbrojeniowej – 235 MPa.

W wyjątkowej sytuacji obliczeniowej, z uwagi na współczynniki redukcyjne obciążeń ψ , zbrojenie doklejane może nie być obliczeniowo wymagane. Jeśli jednak konstrukcyjnie nadal wymaga się wzmocnienia, nawet przy zredukowanych obciążeniach, wtedy, chcąc zapewnić spełnienie kryterium nośności ogniowej R elementu, należy to zbrojenie zabezpieczyć ogniochronnie.

Najczęstszym błędem popełnianym przez projektantów lub inżynierów budowy jest pozostawianie kompozytów FRP (bądź innego zbrojenia) doklejanych niezabezpieczonymi lub niewystarczająco zabezpieczonymi, bez sprawdzenia, czy zachowane zostaną właściwości użytkowe konstrukcji w warunkach pożarowych. Dzieje się tak z powodu niewiedzy bądź błędnych założeń: przyjmowanie złej temperatury krytycznej wzmocnienia (np. 500°C jak dla stali), a nie temperatury szklenia kleju (od ok. 50 do 100°C).



Rys. 1. Przykładowe zabezpieczenia konstrukcji żelbetowych: płyt (po lewej) i belek (po prawej) zbrojeniem doklejanym (zdjęcia firmy Radyab Company)

2. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe

Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe uwzględnia zmienne wraz z temperaturą właściwości materiałowe – zarówno fizyczne, jak i mechaniczne. Ponadto obliczenia wytrzymałościowe wykonuje się przy innych kombinacjach obciążeń. Oddziaływania termiczne na konstrukcje w warunkach pożaru zostały zdefiniowane w PN-EN 1991-1-2 [1] i w zależności od przepisów krajowych, przyjmować można oddziaływanie pożaru standardowego lub naturalnego. Ze względu na przyjęcie przez normę PN-EN 13501-2 [2] oddziaływania standardowego przy definicji klas odporności ogniowej, tylko takie oddziaływanie będzie rozpatrywane w dalszej części pracy.

Zgodnie z PN-EN 1990 [4], w zależności od kategorii obciążenia zmiennego w budynkach, wartość współczynnika ψ_1 wynosi od 0,2 do 0,9, a współczynnika ψ_2 od 0 do 0,8, co w znaczący sposób obniża przyjmowane wartości obciążeń w sytuacji pożarowej. Ze względu na możliwy bardzo niebezpieczny mechanizm zniszczenia żelbetowych konstrukcji wzmocnionych FRP – kruche pęknięcia, zbrojenie doklejanie może pozostać niezabezpieczone jedynie wtedy, gdy element żelbetowy jest w stanie przenieść obciążenia wynikające z wyjątkowej kombinacji projektowej. W przeciwnym przypadku, kompozyty FRP muszą być zabezpieczone w taki sposób, by przez cały czas, wynikający z wymaganej klasy odporności ogniowej, zapewnić niezbędne wzmocnienie konstrukcji, czyli w praktyce – zachować 100% swojej nośności.

Oceny konieczności zabezpieczania zewnętrznego zbrojenia można dokonać zgodnie z PN-EN 1992-1-2 [3]. W pierwszym kroku należy ustalić współczynnik redukcyjny dla obliczeniowego poziomu obciążenia w sytuacji pożarowej.

Kombinacja oddziaływań w przypadku wyjątkowych sytuacji obliczeniowych:

$$\sum G_k + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} + \sum A_d(t) \quad (1)$$

Kombinacja oddziaływań w przypadku trwałej sytuacji obliczeniowej:

$$\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2)$$

Współczynnik redukcyjny η_{fi} dla powyższych kombinacji:

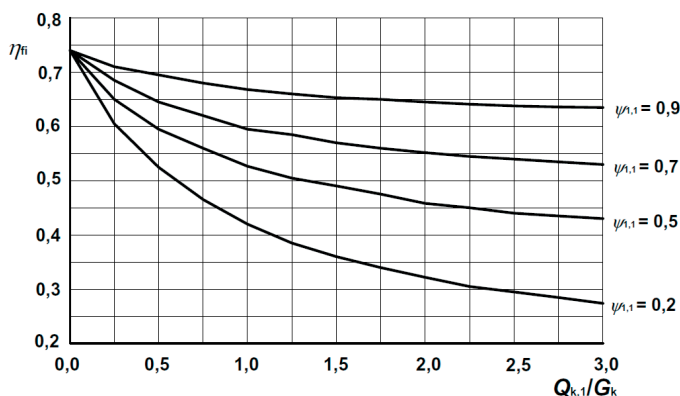
$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (3)$$

gdzie:

- G_k – wartość charakterystyczna oddziaływań stałych,
- $Q_{k,1}$ – wartość charakterystyczna podstawowego oddziaływania zmiennego,
- $Q_{k,i}$ – wartość charakterystyczna pozostałych oddziaływań zmiennych,
- $A_d(t)$ – wartość obliczeniowa oddziaływań spowodowanych pożarem,
- γ_G – współczynnik częściowy dla oddziaływań stałych (zwykle 1,35),

γ_Q – współczynnik częściowy dla oddziaływań zmiennych (zwykle 1,50),
 $\psi_{1,i}, \psi_{2,i}$ – współczynniki kombinacyjne dla obciążeń.

Wartość współczynnika redukcyjnego η_{fi} zależy od stosunku podstawowego obciążenia zmiennego do obciążeń stałych ($Q_{k,1} / G_k$), współczynników częściowych γ_G i γ_Q dla obciążeń stałych i zmiennych, oraz od współczynnika kombinacyjnego dla obciążeń zmiennych ψ_{fi} , który może być przyjmowany jako $\psi_{1,1}$ lub $\psi_{2,1}$. Zgodnie z Załącznikiem Krajowym do PN-EN 1991-1-2 [1] zaleca się przyjmowanie współczynnika kombinacyjnego $\psi_{fi} = \psi_{1,1}$ (wartość częsta). Zależność zilustrowano na Rysunku 2. Zgodnie z PN-EN 1992-1-2- [3] dopuszcza się jako bezpieczne przyjmowanie, z pominięciem dokładniejszej analizy, współczynnika redukcyjnego obciążeń o wartości $\eta_{fi} = 0,7$. Zaleca się jednak obliczyć jego dokładną wartość, gdyż w rzeczywistości jego wartość będzie często niższa.

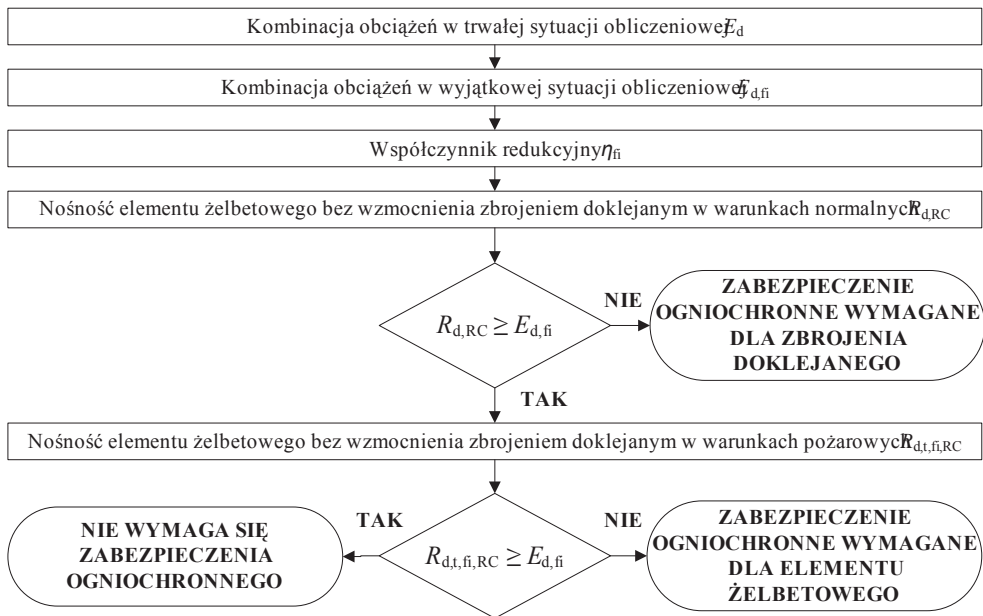


Rys. 2. Zmienność współczynnika redukcyjnego obciążeń w warunkach pożarowych

Po ustaleniu powyższych kombinacji oddziaływań, dla wyjątkowej i trwałej sytuacji obliczeniowej należy określić nośność konstrukcji żelbetowej bez wzmocnienia zbrojeniem doklejanym, w warunkach pożarowych. Norma PN-EN 1992-1-2 [3] podaje łatwe w stosowaniu dane tabelaryczne, zaleca się jednak przeprowadzić szczegółową analizę metodą izotermy 500°C lub metodą strefową – obie opisane z Załączniku B do PN-EN 1992-1-2 [3], jako że dadzą one dokładniejsze wyniki, często wyższą klasę odporności ogniowej elementu.

Jeśli element żelbetowy, z pominięciem zbrojenia doklejanego, zachowuje nośność w warunkach pożarowych przez czas określony w wymaganej klasie odporności ogniowej, zbrojenie doklejanym może pozostać niezabezpieczone. Zdarzyć się może, że konstrukcja żelbetowa jest w stanie przenieść całe obciążenie wynikające z wyjątkowej kombinacji obciążeń, lecz tylko w warunkach normalnych. W takim przypadku zabezpieczenie ogniochronne powinno zostać dobrane z uwagi na zachowanie nośności elementu żelbetowego, a zbrojenie doklejanym można pominąć. W pozostałych przypadkach, kiedy dodatkowo zbrojenie FRP jest wymagane w sytuacji pożarowej, projektując zabezpieczenie ogniochronne za temperaturę krytyczną θ_{cr} należy przyjąć temperaturę szklenia kleju (np. 62°C), na powierzchni styku elementu żelbetowego i zabezpieczenia ogniochronnego.

Schemat blokowy postępowania przedstawiono na Rysunku 3.



Rys. 3. Schemat blokowy ustalania elementów wymagających zabezpieczenia ogniochronnego

3. Systemy zabezpieczeń ogniochronnych i procedura badawcza

Ze względu na niskie wartości temperatury szklenia kleju kompozytów FRP ($62 \div 100^\circ\text{C}$) i zazwyczaj długie okresy oddziaływania pożaru (60 minut i więcej), stosuje się płytowe systemy zabezpieczeń ogniochronnych lub zaprawy ogniochronne.

W chwili obecnej, żadna z norm EN nie podaje metody badawczej, która pozwoliłaby ocenić skuteczność ogniochronną zabezpieczeń na elementach żelbetowych wzmocnionych zbrojeniem doklejjanym. Procedura badawcza podana w PN-ENV 13381-3 [5] standardowo wymaga dwóch badań dla każdego z typów zabezpieczanych elementów (stropów, belek) – jednego przy minimalnej grubości zabezpieczenia, drugiego przy maksymalnej. Ze względu na znaczne różnice w poziomie dobieranych temperatur krytycznych dla elementów żelbetowych, próby te przeprowadza się przy stosunkowo małych grubościach zabezpieczeń (np. 10 i 30 mm). W znacznym stopniu ogranicza to późniejszy zakres stosowania wyników – nie można ekstrapolować grubości zabezpieczeń. Wyniki z tych badań pozwalają zabezpieczać elementy żelbetowe w klasach od R 30 do nawet R 360, jednak nie dostarczają informacji, jak zachowa się system zabezpieczenia ogniochronnego, kiedy będzie zastosowana znacznie grubsza izolacja, w układzie wielu warstw.

Procedura badawcza PB LP-054/1/11-2012 [6], opracowana w Instytucie Techniki Budowlanej, pozwala rozszerzyć zakres stosowania systemów ogniochronnych. Proces ten podzielono na 3 etapy:

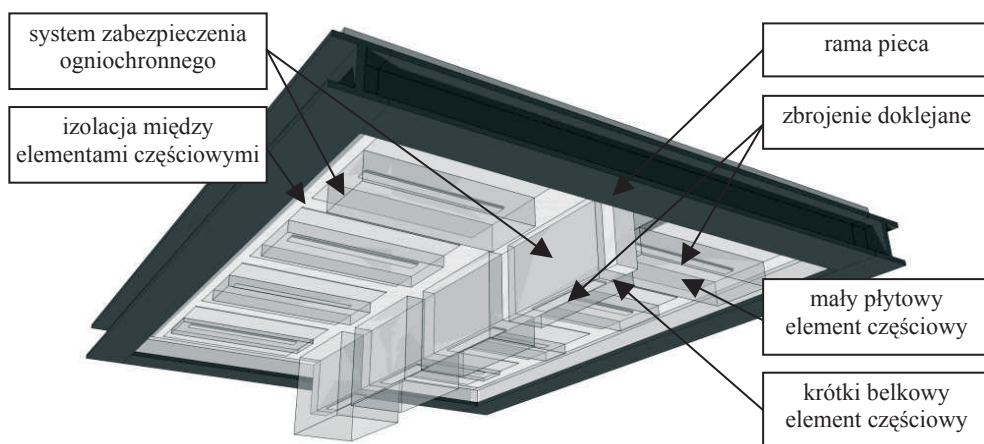
1) analiza danych otrzymanych z badań przeprowadzonych wg PN-ENV 13381-3 [5], w celu wyznaczenia technicznych właściwości termicznych materiału: przewodności cieplnej, ciepła właściwego oraz gęstości materiału ogniochronnego w funkcji temperatury (nie są to fizyczne właściwości materiałowe),

2) bazując na wynikach etapu pierwszego, przeprowadzana się próba ogniową na specjalnym elemencie próbnym, składającym się z mniejszych elementów częściowych – płytowych oraz belkowych, których zbrojenie doklejane zostało zabezpieczone na 30, 60, 120 i 240 minut oddziaływania pożaru wg krzywej standardowej temperatura-czas, na podstawie obliczeń numerycznych

3) analiza wyników otrzymanych bezpośrednio z badania oraz kalibracja właściwości materiałowych przyjętych na podstawie etapu pierwszego oraz dalsza analiza numeryczna zgodnie z Procedurą oceny do PB LP-054/1/11-2012 [7].

Element próbny do dodatkowego badania składa się z małych płytowych elementów częściowych oraz krótkich belkowych elementów częściowych. Zabezpieczenie ogniochronne nakłada się w różnych grubościach (nawet 200 mm) i różnych szerokościach zakładu bocznego. Płytowe elementy częściowe nie są w pełni osłonięte, w celu umożliwienia obserwacji dwukierunkowego przepływu ciepła w betonie. Wszystkie elementy częściowe są od siebie odizolowane wełną skalną o wysokiej gęstości, tak by nie wpływały na siebie. Rozmiar i kształt elementów częściowych oraz izolacji między nimi został sprawdzony numerycznie, by z jednej strony zmaksymalizować liczbę elementów częściowych, a z drugiej zachować takie ich parametry, które zapewnią wysoką użyteczność wyników z nich otrzymanych. Uwzględniając fakt, iż temperatura w elementach żelbetowych wzrasta znacznie szybciej na ich powierzchni niż w zbrojeniu, a zakres temperatur szklenia kleju jest stosunkowo niski ($< 200^{\circ}\text{C}$), zrezygnowano z przykładania obciążenia, jako że nie wpłynęłoby ono na zachowanie się systemu zabezpieczenia ogniochronnego w pożarze.

Wizualizację elementu próbnego przedstawiono na Rysunku 4.



Rys. 4. Wizualizacja elementu próbnego z płytowym system zabezpieczenia ogniochronnego

4. Analiza termiczna i procedura oceny

Na podstawie wyników badań wykonanych zgodnie z PN-ENV 13381-3 [5] oraz Procedury badawczej PB LP-054/1/11-2012 [6] ustala się techniczne właściwości termiczne materiału zabezpieczenia ogniochronnego. Pierwsza iteracja kształtu wykresu ustalana jest na podstawie składu chemicznego materiału, jego właściwości w temperaturze normalnej oraz na podstawie przebiegu temperatury w materiale podczas badania ogniowego. Szczególnie wszystkie „półki i wypłaszczenia” wykresu mogą wskazywać na poziomy temperatur, w których następuje przemiana fazowa, a co za tym idzie można spodziewać się wzrostu wartości na wykresie ciepła właściwego. W kolejnych iteracjach modyfikuje się wartości techniczne właściwości termicznych materiału, aż do osiągnięcia założonego poziomu zgodności z wynikami badań.

Ze względu na nieliniowość zjawiska, zmiennych warunków nagrzewania pomiędzy poszczególnymi badaniami, różne właściwości samego materiału między partiami produkcyjnymi oraz możliwe błędy w wykonaniu zabezpieczenia ogniochronnego, ustala się kilka zestawów właściwości materiałowych dla mniejszych zakresów grubości i w zależności od liczby nakładanych warstw (w przypadku płytowych systemów zabezpieczeń).

Procedura oceny [7], przewiduje dwie metody ustalania skuteczności zabezpieczenia ogniochronnego elementów żelbetowych wzmocnionych zewnętrznym zbrojeniem doklejającym: graficzną oraz numeryczną. W metodzie graficznej, bazując na bezpośrednim

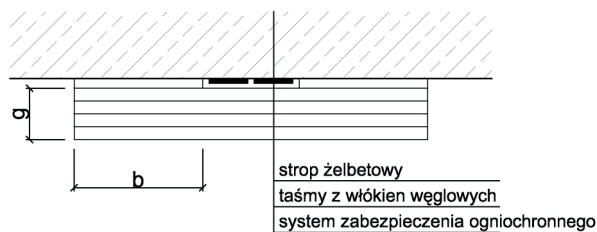
wynikach z badania, na wykresie temperatura-czas nanosi się wyniki każdego z przebadanych wariantów zabezpieczenia ogniochronnego, a następnie umieszcza się granice w postaci temperatur krytycznych – temperatur szklenia kleju (np. 62°C, 80°C, 100°C). Wyniki dla grubości pośrednich można interpolować. Wyniki uzyskane w metodzie graficznej mogą zostać stabelaryzowane. Przykładowe dane podano w Tabelicy 1 i 2, a oznaczenia wyjaśniono na Rysunku 5. Należy pamiętać, iż dane uzyskane bezpośrednio z badania dotyczą tylko płaskich płyt żelbetowych, pozbawionych przebieć czy nieregularności w okolicy zbrojenia doklejanego.

Tabela 1. Przykładowe dane tabelaryczne dla płyty

g / b [mm / mm]	Temperatura [°C] po czasie nagrzewania wg krzywej standardowej			
	30 min	60 min	120 min	240 min
25 / 25	82	218	403	646
25 / 50	48	136	284	508
50 / 50	45	82	199	409
50 / 100	30	45	87	247
100 / 100	24	36	69	120
100 / 150	22	26	41	81
150 / 150	21	24	38	77
100 / 200	22	25	33	59
150 / 200	21	22	28	51
150 / 250	21	22	26	38

Tabela 2. Przykładowe dane tabelaryczne dla belek

g = b [mm]	Temperatura [°C] po czasie nagrzewania wg krzywej standardowej			
	30 min	60 min	120 min	240 min
25	44	113	256	547
50	31	44	77	270
100	23	28	37	61
150	21	23	29	41
200	20	21	25	34

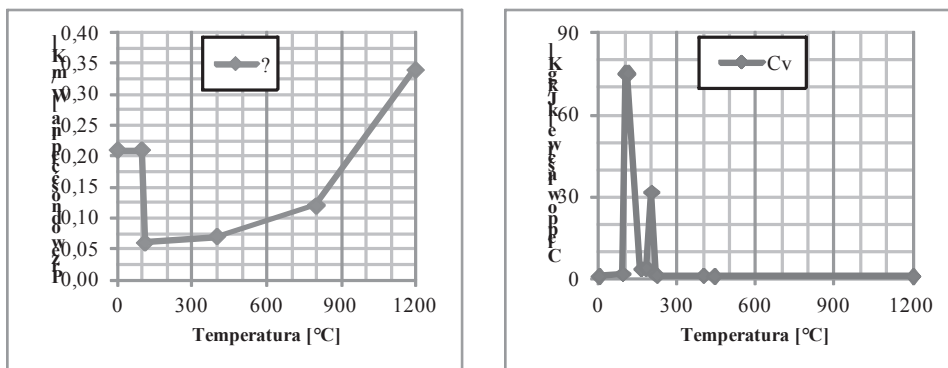


g – grubość systemu zabezpieczenia ogniochronnego
b – szerokość zakładu bocznego

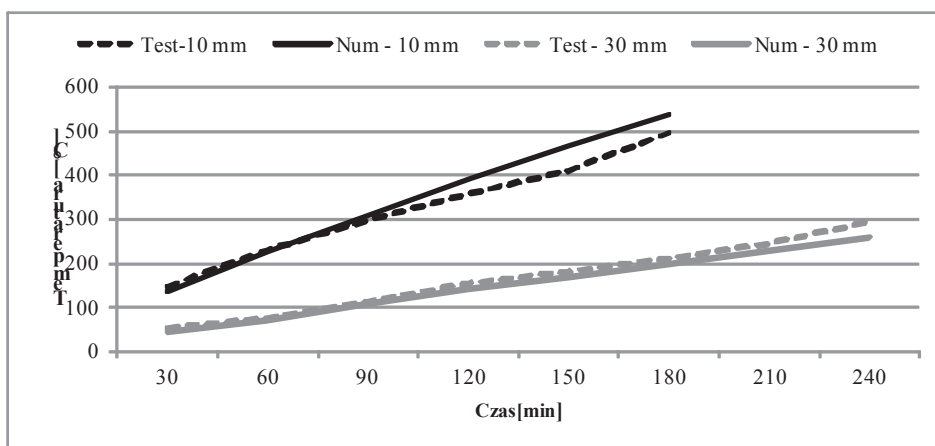
Rys.5. Przekrój przez płytę żelbetową wzmocnioną taśmami z włókien węglowych

Metoda numeryczna skupia się na wykorzystaniu ustalonych parametrów materiałowych, pozwalając na analizę bardziej złożonych sytuacji projektowych, takich jak nieregularna geometria elementów, obecność przebieć i otworów, złożone systemy zabezpieczeń (maty).

Przykładowe wyniki analizy termicznej dla systemu zabezpieczenia ogniochronnego, w zakresie grubości 10 ÷ 30 mm, przedstawiono na Rysunku 6 i 7.



Rys. 6. Przykładowe wyniki analizy termicznej dla system zabezpieczenia ogniochronnego



Rys. 7. Porównanie wyników badania ogniowego z symulacją numeryczną

5. Wnioski

Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe konstrukcji żelbetonowych wzmocnionych zewnętrznym zbrojeniem doklejającym polega przede wszystkim na sprawdzeniu nośności elementów przy wyjątkowej kombinacji oddziaływań, po zadanym czasie oddziaływania pożaru. Zalecanymi metodami oceny są metoda izotermi 500°C i metoda strefowa. Wyróżnić można trzy przypadki projektowe: 1. konstrukcja żelbetowa (bez zewnętrznego zbrojenia doklejanego) jest w stanie przenieść siły wynikające z wyjątkowej kombinacji oddziaływań przez czas wymagany dla zadanej klasy odporności ogniowej elementu; 2. ta sama konstrukcja jest w stanie przenieść te same siły, lecz przez czas krótszy niż wymagany dla zadanej klasy odporności ogniowej; 3. konstrukcja żelbetowa nie jest w stanie przenieść sił od wyjątkowej kombinacji oddziaływań, nawet bez oddziaływania pożaru. W pierwszym przypadku zabezpieczenie zbrojenia doklejanego nie będzie wymagane; w drugim element konstrukcyjny należy zabezpieczać z uwagi na temperaturę krytyczną zbrojenia; w trzecim zabezpieczać należy również zbrojenie FRP, przyjmując za temperaturę krytyczną temperaturę szklenia kleju zbrojenia FRP.

Literatura

- 1 PN-EN 1991-1-2:2006. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-2: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru.
- 2 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.
- 3 PN-EN 1992-1-2:2008. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-2: Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.
- 4 PN-EN 1990:2004. Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji.
- 5 PN-ENV 13381-3:2004. Metody badawcze ustalania wpływu zabezpieczeń na odporność ogniową elementów konstrukcyjnych – Część 3: Zabezpieczenia elementów betonowych
- 6 Procedura badawcza PB LP-054/1/11-2012. Badania skuteczności ogniochronnej zabezpieczeń taśm stanowiących zewnętrzne doklejane zbrojenie elementów z betonu.
- 7 Procedura oceny do PB LP-054/1/11-2012. Procedura oceny skuteczności ogniochronnej zabezpieczeń taśm stanowiących zewnętrzne doklejane zbrojenie elementów z betonu.

The structural fire design of concrete structures with externally bonded reinforcement and fire protection system

Piotr Turkowski¹

¹ *Fire Research Department, Building Research Institute, e-mail: p.turkowski@itb.pl*

Abstract: This work describes the structural fire design process of RC structures with externally bonded reinforcement. First part is based on the calculation method given in EN 1992-1-2 and addresses the question whether the fire protection of externally bonded reinforcement is necessary in every situation? The second part shows what such fire protection should look like and how it should be designed. Moreover, a test procedure for determining the effectiveness of applied fire protection systems to concrete structural members reinforced with FRP, used in Fire Testing Laboratory of Building Research Institute (ITB) is presented.

Keywords: concrete structures, FRP, structural fire design, fire protection systems.