

ARTYKUŁY – REPORTS

Miroslaw Kosiorek*

Andrzej Borowy**

Bogdan Wróblewski***

ODPORNOŚĆ OGNIOWA ELEMENTÓW ZGINANYCH ZE ZBROJENIEM ZEWNĘTRZNYM

W przypadku adaptacji budynków z uwagi na zmianę sposobu użytkowania, jak i wprowadzania nowych urządzeń technologicznych i spowodowany tym wzrost obciążeń stosuje się wzmocnienia elementów zginanych za pomocą zbrojenia doklejanego. Początkowo jako zbrojenie doklejanego stosowano stal. Ostatnio coraz częściej jako zbrojenie doklejanego stosuje się taśmy z włókna węglowego. Elementy wzmocniane z uwagi na zapewnienie nośności powinny także spełniać wymagania dotyczące odporności ogniowej. W latach osiemdziesiątych w Zakładzie Badań Ogniowych ITB przeprowadzono cykl badań elementów żelbetowych wzmocnionych doklejanym zbrojeniem stalowym. Wnioski z tych badań mają charakter ogólny i w dużym stopniu dotyczą także zbrojenia doklejanego z włókien węglowych, gdyż w warunkach badań ogniowych o nośności elementu w większym stopniu decydują właściwości połączenia niż właściwości materiału wzmocniającego.

1. Wprowadzenie

W celu zwiększenia nośności płyt i belek żelbetowych stosuje się zbrojenie zewnętrzne. Zbrojenie to wykonywano początkowo z płaskowników stalowych. Obecnie coraz częściej stosuje się taśmy z włókien węglowych. Współpracę taśm z włókien węglowych z elementem żelbetowym zapewnia się przez spoinę klejową. Płaskowniki stalowe klei się, ale oprócz tego można stosować dodatkowe zakotwienia mechaniczne rozmieszczone wzdłuż długości elementu lub na jego końcach.

Wzmocnienia dokleja się za pomocą kleju epoksydowego o temperaturze mięknięcia około 45 °C.

Włókna węglowe są zatapiane w matrycy o temperaturze mięknięcia 100 °C – 150 °C. Są one odporne na działanie wysokiej temperatury, jednak jej wpływ na właściwości mechaniczne nie został bliżej poznany.

* dr hab. inż.– prof. w ITB

** dr – adiunkt w ITB

*** mgr inż. – st. specjalista bad.-techn. w ITB

W przypadku gdy współpraca zbrojenia wzmacniającego z elementem żelbetowym jest zapewniona wyłącznie przez spoinę klejową, nie ma potrzeby prowadzenia badań, gdyż łatwo przewidzieć, że zbrojenie doklejane w warunkach ogniowych nie odgrywa istotnej roli.

Jeżeli zbrojenie jest dodatkowo mocowane mechanicznie, o nośności elementu w warunkach ogniowych decyduje wpływ temperatury na właściwości mechaniczne zbrojenia oraz na podatność łączników.

Temperatura nieizolowanego zbrojenia wzrasta bardzo szybko. W ciągu kilku minut nastąpi bądź zniszczenie matrycy, w której są zatopione włókna, bądź spadek wytrzymałości zbrojenia stalowego będzie tak znaczny, że jego rola w przenoszeniu obciążeń stanie się nieistotna.

Istnieje jednak możliwość, że element wzmocniony zbrojeniem doklejonym będzie miał wymaganą odporność ogniową. Można to osiągnąć przez zastosowanie odpowiedniej izolacji, ale może się okazać, że nie jest to konieczne.

2. Zasady określania odporności ogniowej elementów ze zbrojeniem doklejaniem

Pożar jest oddziaływaniem o charakterze wyjątkowym [1], [2]. W związku z tym w obliczeniach stosuje się kombinację wyjątkową oddziaływań [3]:

$$\Sigma \gamma_{GA} G_k + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \Sigma \Psi_{2,i} Q_{k,i} \left(+ \Sigma A_d(t) \right) \quad (1)$$

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, tj. oddziaływań pośrednich i dodatkowych omówionych powyżej,
 γ_{GA} – częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla obciążeń stałych; w sytuacji wyjątkowej $\gamma_{GA} = 1,0$,
 $\Psi_{1,1}; \Psi_{2,i}$ – współczynniki określania wartości reprezentowanych obciążeń według Eurokodu 1 [3]. Ich wartości zależą od typu i kategorii obciążenia zmiennego i wynoszą:

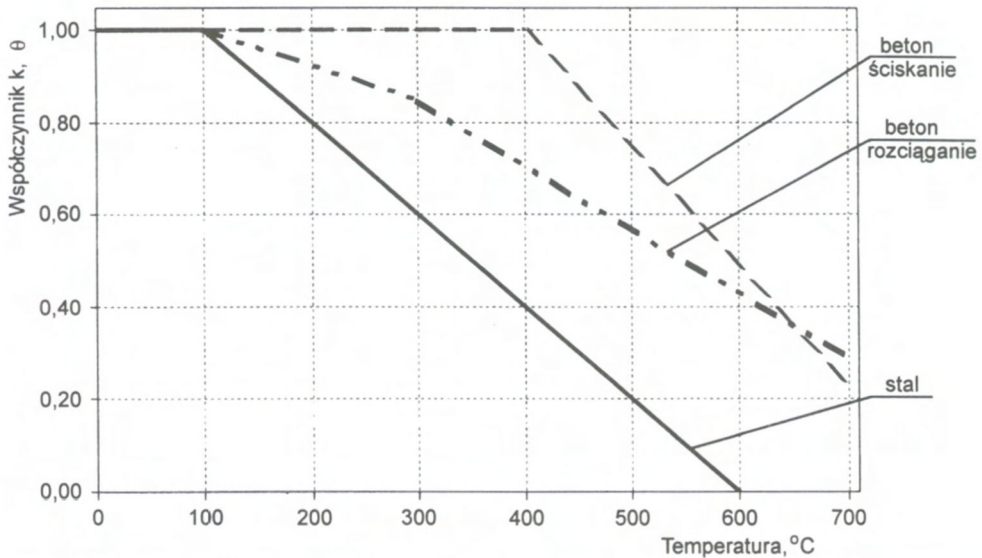
$$\Psi_{1,1} = 0,2 - 0,9 \quad \text{oraz} \quad \Psi_{2,i} = 0,0 - 0,8$$

Jeżeli nie zachodzi konieczność uwzględniania pośrednich oddziaływań pożaru, dopuszcza się uproszczone sposoby określania obciążeń konstrukcji.

Aby określić nośność przekroju, przyjmuje się charakterystyczne wartości wytrzymałości materiałów konstrukcyjnych.

Według prEN 1992-1-2 [4] wytrzymałość charakterystyczna stali zbrojeniowej zmienia się zgodnie z rysunkiem 1.

O ile przy sprawdzaniu nośności w warunkach ogniowych przyjmujemy oddziaływania i wytrzymałość o wartościach charakterystycznych, to w warunkach normalnych przyjmuje się wartości obliczeniowe tych wielkości.



Rys. 1. Współczynniki $k(\theta)$ określania wytrzymałości charakterystycznych w funkcji temperatury (beton zwykły, stal walcowana na gorąco)
 Fig. 1. Coefficients $k(\theta)$ for determination of characteristic strength in the function of temperature (ordinary concrete, hot rolling steel)

Ze względów konstrukcyjnych nośność elementu jest zwykle wyższa od nośności niezbędnej do spełnienia warunku stanu granicznego. Każdy element ma więc już pewną odporność ogniową.

Jeżeli nośność pierwotnego przekroju po czasie t , określona przy przyjęciu wytrzymałości charakterystycznych $N_{CH}(\theta_{(t)} = \theta_1)$ nie będzie mniejsza w temperaturze $\theta_{(t)} = \theta_1$ od uogólnionych sił wewnętrznych $E_{(CH)}$ wywołanych obciążeniem o wartości charakterystycznej, zbrojenia doklejonego nie trzeba zabezpieczać. Jeżeli natomiast $N_{CH}(\theta_{(t)} = \theta_1) < E_{(CH)}$, to możliwe są trzy drogi:

1. Zaizolowanie przekroju poprzecznego w taki sposób, aby obniżyć jego temperaturę do temperatury $\theta_2 < \theta_1$, tak aby:

$$N_{CH}(\theta_{(t)} = \theta_2) \geq E_{(CH)}$$

2. Zaizolowanie wyłącznie zbrojenia doklejonego, tak aby można było uwzględnić jego współpracę w wysokiej temperaturze.

3. Zaizolowanie przekroju w celu obniżenia jego temperatury oraz temperatury zbrojenia doklejonego.

W przypadku 2 i 3 niezależnie od tego, jaką część obciążenia przenosi zbrojenie doklejone, jego izolację trzeba tak zaprojektować, aby nie została przekroczona temperatura mięknięcia spoiny klejowej. Niezbędna grubość izolacji może osiągać wartość kilkunastu centymetrów, przy czym wymagany jest duży stopień pewności, że izolacja nie odpadnie lub nie ulegnie degradacji pod wpływem działania ognia, gdyż grozi to gwałtownym zniszczeniem w czasie znacznie krótszym od wymaganej odporności ogniowej.

3. Wyniki badań

W pierwszej części badań w Zakładzie Badań Ognioowych ITB, wykonanych na zlecenie Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, sprawdzono czas potrzebny do osiągnięcia temperatury 45 °C w spoinie klejonej. Badanie przeprowadzono na nieobciążonych płytach 1000 mm × 1000 mm. W osiach płyt dzielących boki na połowy przyklejono płaskowniki stalowe o przekroju 100 mm × 4 mm. Płaskowniki zaizolowano według poniższego zestawienia:

plyta 1	tynek cementowy na siatce 20 mm	$a = 20$ mm
plyta 2	tynek cementowy na siatce 20 mm	$a = 20$ mm
plyta 3	tynek cementowy na siatce 20 mm	$a = 20$ mm
plyta 4	tynek cementowo-wapienny na siatce 20 mm	$a = 20$ mm
plyta 5	tynek gipsowo-wapienny na siatce 20 mm	$a = 20$ mm
plyty 6–9	tynek cementowy na siatce 20 mm + GKF 12,5 mm	$a = 20$ mm $a' = 12,5$ mm

Czas do osiągnięcia temperatury 45 °C w przypadku pierwszych czterech izolacji wynosił średnio 9 min.

Przy dodatkowym zabezpieczeniu za pomocą płyt GKF otrzymano znaczny rozrzut wyników: od 12,5 min do 28 min.

Druga część badań obejmowała badania belek obciążonych, według zestawienia:

belka nr 1 – żelbetowa, zbrojona konwencjonalnie, o nośności teoretycznej;

belka nr 2 – wzmocniona doklejonym zbrojeniem zewnętrznym współpracującym tylko dzięki spoiwu klejowemu (klej epoksydowy);

belka nr 3 – wzmocniona doklejonym zbrojeniem zewnętrznym zakotwionym dodatkowo na końcach za pomocą dwóch łączników rozporowych.;

belka nr 5 – wzmocniona doklejonym zbrojeniem zewnętrznym zakotwionym na końcach doklejonymi nakładkami stalowymi i za pomocą dwóch łączników rozporowych;

Belki nr 2 – nr 5 zostały zabezpieczone warstwą betonu natryskowego (torkretu) z zastosowaniem siatki podtynkowej. Grubość warstwy torkretu wynosiła 15 mm – 25 mm.

Belki obciążono grawitacyjnie dwiema siłami 37,6 kN, wywołującymi moment zginający 54 kN.

W przypadku belki zbrojonej konwencjonalnie obliczeniowa nośność przekroju wynosiła 55,7 kNm, natomiast w przypadku belek ze zbrojeniem doklejanym 58,4 kNm. Zniszczenie belki nr 1 nastąpiło w 74 min, belki nr 2 w 92 min, belki nr 3 w 110 min, a belki nr 5 w 127 min. Charakterystyczne było zniszczenie belek nr 3 i nr 5, które nastąpiło w sposób gwałtowny przez zerwanie zbrojenia pierwotnego, podczas gdy w przypadku belek nr 1 i nr 2 następował duży przyrost przemieszczeń.

Z przeprowadzonych badań wynika, że temperatura 45 °C występuje w spoinie klejowej w przypadku tynków na siatce średnio już po 9 min (a w niektórych przypadkach nawet wcześniej). Czas osiągnięcia tej temperatury w spoinie potwierdzają także wyniki rejestracji temperatury w belkach. Stosowanie płyt gipsowo-kartonowych nie było dobrym rozwiązaniem ze względu na ich szybkie odpadanie.

Podczas badań odporności ogniowej belek żelbetowych wzmocnionych zbrojeniem doklejonym zewnętrznym najlepiej zachowała się belka nr 5, w której doklejone zbrojenie

zewnątrzne było zakotwione na końcach za pomocą doklejanych nakładek stalowych i łączników rozporowych.

Zniszczenie dodatkowo zaizolowanych belek nr 3 i nr 5 nastąpiło w sposób gwałtowny na skutek zerwania zbrojenia pierwotnego.

4. Omówienie wyników i wnioski

Odporność ogniu belek wzmocnionych i dodatkowo zaizolowanych była wyższa niż belek bez wzmocnienia, o podobnej nośności w warunkach normalnych. Po badaniu widoczne było zniszczenie izolacji, tym niemniej do momentu przzerwania jej spójności z całą pewnością opóźniła ona dopływ ciepła do zbrojenia. Trudno mówić o znaczeniu spoiny klejowej, gdyż przeprowadzone badania wskazują, że zbrojenie doklejone tak długo przenosi obciążenie, jak długo jest zakotwione i niezbyt obciążone termicznie. Gdy temperatura w zbrojeniu zewnętrznym znacznie się podniesie (co następuje dość szybko po odpadnięciu warstwy torkretu), na skutek dużych odkształceń przestaje ono praktycznie przenosić obciążenie. Tu kryje się istota mechanizmu zniszczenia. Po wydłużeniu i uplastycznieniu zbrojenia doklejonego całość obciążenia zewnętrznego dość gwałtownie zostaje przekazana na zbrojenie wewnętrzne, które również jest osłabione wpływem temperatury. Gwałtowna redystrybucja obciążeń powoduje utratę nośności elementu i zerwanie prętów zbrojenia wewnętrznego.

Dodatkowa izolacja stosowana z uwagi na ochronę spoiny klejowej powoduje także znaczne obniżenie temperatury przekroju pierwotnego, a więc i wzrost jego nośności (temperatura zbrojenia w belce zbrojonej konwencjonalnie była wyższa o około 300 °C od temperatury zbrojenia wewnętrznego w belce z zaizolowanym zbrojeniem doklejonym).

Drugim czynnikiem powodującym wzrost odporności ogniowej belek ze zbrojeniem zewnętrznym były zakotwienia mechaniczne, przy czym znacznie korzystniejsze jest mocowanie zbrojenia za pomocą nakładek stalowych na końcach i za pomocą łączników rozporowych wzdłuż długości, niż kotwienie tego zbrojenia tylko na końcach.

Wyniki badań wskazują na to, że spoina klejowa nie odgrywa istotnej roli we współpracy zbrojenia zewnętrznego z belką. Temperatura mięknięcia spoiny przy zastosowanych izolacjach była osiągnięta już w początkowej fazie badania.

Zabezpieczenie zbrojenia doklejonego musi więc być wykonywane z materiałów o znacznie lepszych właściwościach izolacyjnych niż beton. Znacznie większa musi być także grubość izolacji. Przykładowo, przy izolacji z wełny mineralnej o gęstości około 100 kg/m³ i grubości 10 cm temperatura mięknięcia spoiny zostaje osiągnięta po około 40 min. Temperatura krytyczna zbrojenia doklejonego, niezależnie od tego, z jakiego materiału jest ono wykonane, jest równa temperaturze mięknięcia spoiny klejowej. Wynosi ona około 45 °C, podczas gdy temperatura krytyczna stali wynosi od 400 °C do 600 °C. Jeżeli więc istnieje konieczność uwzględnienia zbrojenia doklejanego z uwagi na odporność ogniową, zapewnienie jego współpracy z elementem żelbetowym może być związane z koniecznością wykonywania grubych izolacji i znacznym obniżeniem wysokości pomieszczenia.

Jak podano w p. 2, uwzględnienie zbrojenia doklejanego nie zawsze jest jednak konieczne. Wynika to z mniejszych wartości obciążeń i większych wartości wytrzymałości przyjmowanych do obliczania nośności przy oddziaływaniu warunków symulujących

pożar niż przy sprawdzaniu stanów granicznych nośności w warunkach normalnych oraz z pewnego przewymiarowania przekroju, które zwykle następuje podczas projektowania.

Pominięcie zbrojenia doklejanego przy określaniu odporności ogniowej jest możliwe w dwóch przypadkach:

- Obliczeniowego wykazania, że po określonym czasie ogrzewania, odpowiadającym wymaganej klasie odporności ogniowej, nie została wyczerpana nośność elementu o przekroju pierwotnym. W tym przypadku nie jest konieczne wykonywanie dodatkowej izolacji przekroju.
- Obniżenia temperatury pierwotnego przekroju poprzecznego przez zastosowanie izolacji i sprawdzenie jego nośności w podobny sposób jak poprzednio. W tym przypadku niezbędne jest wprowadzić dodatkowe zaizolowanie elementu, ale izolacja jest znacznie cieńsza niż izolacja projektowana z uwagi na temperaturę krytyczną spoiny klejowej.

Badanie elementów ze zbrojeniem zewnętrznym przeprowadzono w połowie lat osiemdziesiątych, gdy zasób dostępnych technologii umożliwiających zabezpieczenie konstrukcji przed wzrostem temperatury był ograniczony. Zbrojenie zewnętrzne było wykonane z płaskowników stalowych klejonych i mocowanych mechanicznie, podczas gdy obecnie rozpowszechnia się technologia doklejanego zbrojenia z włókien węglowych, niemniej wnioski – w szczególności dotyczące charakteru zniszczenia – są nadal aktualne.

Szczególnie istotne jest dobranie odpowiedniej technologii zabezpieczenia zbrojenia doklejanego (jeżeli zachodzi taka konieczność).

Należy zwrócić uwagę na gwałtowny charakter zniszczenia w momencie, gdy zbrojenie doklejone przestaje uczestniczyć w przenoszeniu obciążeń. Sytuacja taka powstaje wówczas, gdy izolacja zbrojenia doklejanego jest zbyt cienka, lub w przypadku odpadnięcia izolacji. W sposób gwałtowny następuje wtedy obciążenie przekroju pierwotnego, prowadzące do niesygnalizowanego zniszczenia.

Może się także okazać, że w niektórych przypadkach wzmocnienie stalowe mocowane mechanicznie jest rozwiązaniem korzystniejszym niż zbrojenie z doklejanymi włókienami węglowymi, gdyż konsekwencje wynikające z konieczności zapewnienia odporności ogniowej są większe niż korzyści z zastosowania pozornie prostej technologii. Dlatego wybór sposobu wykonania wzmocnienia powinien być poprzedzony nie tylko analizą nośności w normalnych warunkach, lecz także oceną odporności ogniowej i uwzględnieniem zabezpieczeń ogniochronnych.

Bibliografia

- [1] Kosiorek M.: Parametry materiałowe i obciążenia przy określaniu odporności ogniowej. *Prace Instytutu Techniki Budowlanej – Kwartalnik*, 4, 1988, s. 5–14
- [2] Kosiorek M.: Oddziaływanie pożaru na budynek. XIX Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie budowlane”, Szczecin – Międzyzdroje, 1999, Referaty problemowe
- [3] ENV 1991-2-2- Eurocode 1: Basis of design and actions on structures – Part 2–2: Actions on structures exposed to fire
- [4] prEN 1992-1-2: Design of concrete structures – Part 1.2: General rules – Structural fire design, July 2001

FIRE RESISTANCE OF ELEMENTS SUBJECTED TO BENDING WITH EXTERNALLY BOUNDED REINFORCEMENT

Summary

In case of buildings adaptation caused by changing in the way of using as well as in case of introducing the new technological installations, the strengthenings of elements subjected to bending by means of externally bounded reinforcement are applied. Formerly, steel was used as externally bounded reinforcement. In recent period, the reinforcement by means of externally bounded carbon fibres plates (CFRP) are introduced. The elements strengthened by such reinforcement shall meet not only the requirements concerning mechanical resistance and stability, but also requirements in relation to fire resistance. In the Fire Research Department ITB, in eighties, the cycle of tests of reinforced concrete elements strengthened by externally bounded steel reinforcement was carried out. Although the strengthening material was different than actually applied, the conclusions drawn from those tests have got more general character and, to a great extent, they concern also externally bounded carbon fibres reinforcement.

Praca wpłynęła do Redakcji 21 VIII 2001