

Wpływ temperatury zbrojenia na sztywność belek żelbetonowych w warunkach pożarowych

Michał Głowacki¹, Marian Abramowicz², Robert Kowalski³

^{1,3} Instytut Inżynierii Budowlanej, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska, e-mail: m.głowacki@il.pw.edu.pl, r.kowalski@il.pw.edu.pl

² Katedra Bezpieczeństwa Budowli, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego, Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie, e-mail: mabramowicz@sgsp.edu.pl

Streszczenie: W referacie przedstawiono analizę w zakresie wpływu wysokiej temperatury na belki z ogrzewaną strefą rozciąganą. Badania w wysokiej temperaturze przeprowadzono pod działaniem stałego obciążenia, wynoszącego 50 albo 70% siły niszczącej, zapewniającego stałą wartość momentu zginającego w środkowej ogrzewanej części belki. Zbadano belki o dwóch stopniach zbrojenia: 0,44 albo 1,13%. W sumie rozpatrzono cztery serie belek, po trzy w każdej serii (12 elementów). W referacie przeanalizowano względne obniżenie sztywności przekroju belek w zależności od temperatury zbrojenia. Sztywności uzyskane eksperymentalnie, obliczone dwoma sposobami (pomiar maksymalnego ugięcia elementu lub pomiar ugięć w trzech punktach badanego odcinka) porównano z wynikami obliczeń przeprowadzonych według wymagań Eurokodu. Z przeprowadzonej analizy wynika, iż obniżenie sztywności elementu obliczone na podstawie wymagań Eurokodu jest nieco większe od określonego eksperymentalnie.

Słowa kluczowe: belki żelbetonowe, ugięcie, krzywizna, sztywność, wysoka temperatura

1. Wprowadzenie

Sztywność oraz nośność przekrojów elementów żelbetonowych narażonych na działanie wysokiej temperatury obniża się znacznie na skutek pogorszenia cech mechanicznych betonu i stali zbrojeniowej [1, 2]. W praktyce podczas działania pożaru na zginane elementy konstrukcyjne (płyty lub belki) ogrzewaniu może być poddana rozciągana albo ściskana strefa przekroju. Sztywność przekroju z ogrzewaną strefą rozciąganą (zbrojeniem) obniża się znacznie szybciej niż w przypadku gdy na działanie pożaru jest narażona strefa ściskana przekroju [3, 4, 5].

Pierwsze analizy wyników badań wpływu wysokiej temperatury na obniżenie sztywności zginanych elementów żelbetonowych zaprezentowano w pracy [3]. Przedstawiono tam szczegółowy opis badań i porównanie względnego obniżenia sztywności belek z ogrzewaną strefą rozciąganą oraz ściskaną w zależności od czasu ogrzewania. Obniżenie sztywności przekrojów belek obliczono na podstawie pomierzonego maksymalnego ugięcia.

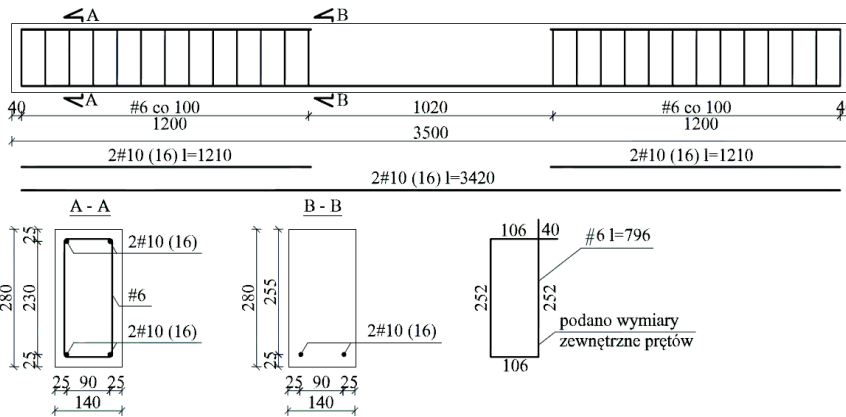
W tej pracy rozszerzono zakres analiz dotyczących obniżenia sztywności belek z ogrzewaną strefą rozciąganą. Przedstawiono wyniki obliczeń pól temperatury (MES), na podstawie których określono temperaturę zbrojenia, zastosowano alternatywny sposób wyznaczenia względnego obniżenia sztywności przekroju belek oraz porównano wartości uzyskane eksperymentalnie z wynikami obliczeń przeprowadzonych według wymagań Eurokodu [1].

2. Badania eksperymentalne

2.1. Elementy

W wysokiej temperaturze zbadano w sumie 24 belki żelbetonowe o przekroju 140x280 mm, długości 3500 mm. Wszystkie elementy wykonano z betonu klasy C25/30

z kruszywem żwirowym (krzemianowym). Zbrojenie główne stanowiły dwa pręty o średnicy 10 albo 16 mm (stopień zbrojenia $\rho_f=0,44$ albo 1,13%) wykonane ze stali gatunku B500SP. Wymiary oraz sposób zbrojenia belek przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Wymiary oraz zbrojenie badanych belek

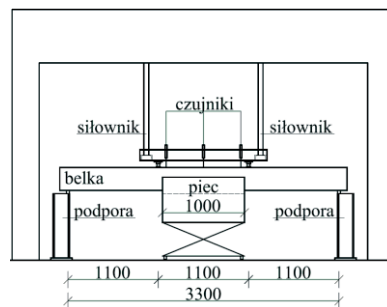
1.2. Przebieg badań

W badaniach przyjęto dwa schematy statyczne zapewniające stałą wartość momentu zginającego na środkowym, ogrzewanym odcinku belki. W pierwszym schemacie belkę podparto swobodnie na końcach i obciążono dwiema siłami skupionymi usytuowanymi w 1/3 rozpiętości. W schemacie drugim belkę odwrócono, podpory umieszczono w 1/3 rozpiętości, a obciążenie przyłożono na końcach. Jak już wspomniano wyżej w tej pracy ograniczono się do przeprowadzenia analiz elementów zbadanych w schemacie pierwszym, tzn. z ogrzewanym zbrojeniem (rys. 2). W ten sposób zbadano 12 elementów podzielonych na cztery serie (2 stopnie zbrojenia x 2 poziomy wyteżenia; 3 jednakowe elementy w każdej serii). Belki w pierwszej kolejności obciążono do poziomu wynoszącego 50 albo 70% wartości siły niszczonej, a następnie ogrzewano pod działaniem stałych sił aż do zniszczenia.

a)



b)



Rys. 2. Badania według schematu, w którym była ogrzewana strefa rozciągana: a) wygląd stanowiska, b) schemat stanowiska

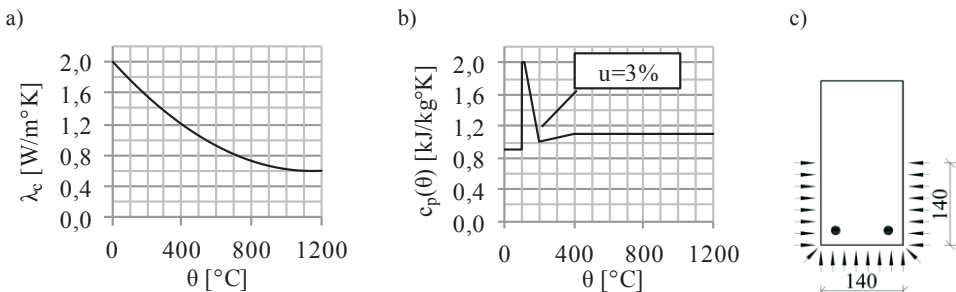
3. Temperatura zbrojenia

Zasadniczym celem przedstawionych niżej obliczeń było określenie wartości temperatury poszczególnych prętów zbrojeniowych. Bezpośrednie pomierzenie tej wartości byłoby bardzo trudne, a praktycznie niemożliwe, ponieważ wymagałoby umieszczenia termopar w środku pręta. W przypadku usytuowania termopar na powierzchni prętów uzyskane wyniki nie byłyby adekwatne. Podczas badań mierzono zatem temperaturę w wybranych miejscach przekroju (rys. 5).

Obliczenie rozkładu temperatury w przekroju elementu żelbetowego metodą elementów skończonych wymaga znajomości przewodności cieplnej i ciepła właściwego betonu oraz określenia strumienia ciepła przenikającego do wnętrza elementu przez jego powierzchnię. Ciepło to jest przekazywane przez konwekcję i promieniowanie, przy czym wiadomo, iż decydującą rolę odgrywa promieniowanie. W normie [6] są podane podstawowe informacje na temat określenia składowych strumieni ciepła, które może wnikać do wnętrza elementów żelbetowych narażonych na warunki pożarowe, pochodzących od konwekcji i promieniowania. Informacje te są jednak bardzo ogólne i nie można bezkrytycznie założyć, iż mogą one wiarygodnie odwzorowywać warunki, w jakich znajdowały się belki badane przez autorów w piecu elektrycznym.

W związku z powyższym w przeprowadzonych obliczeniach (od razu) zdefiniowano wartości temperatury występującej na powierzchni betonu, wykorzystując wyniki przeprowadzonych pomiarów.

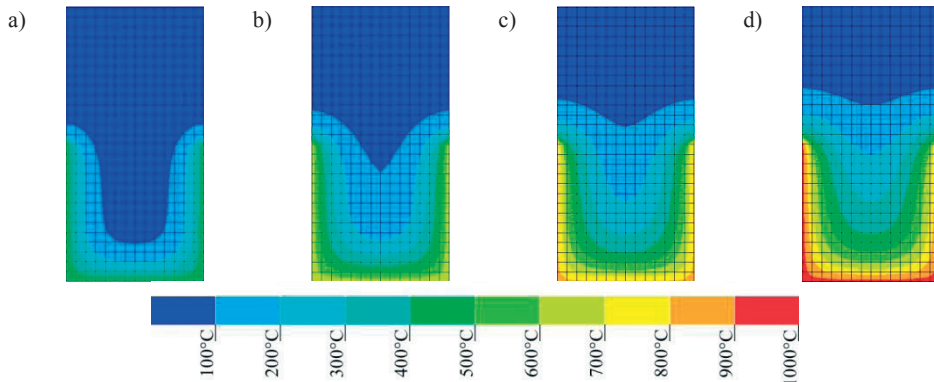
Obliczenia przeprowadzono za pomocą programu ANSYS, przyjmując dane charakteryzujące przepływ ciepła w betonie zaczerpnięte z [1]: przewodność cieplną – wg rys. 3a, ciepło właściwe – wg rys. 3b (beton o wilgotności 3%), gęstość objętościową – 2400 kg/m^3 . Rozpatrzono dwuwymiarowy model przekroju belki, składający się z ortogonalnych elementów ośmiowęzłowych o boku 1 cm. Przyjęto, iż wysoka temperatura panowała na dolnej krawędzi przekroju belki oraz na części powierzchni bocznych o wysokości 14 cm, licząc od dołu, co odpowiadało warunkom występującym podczas eksperymentu (rys. 3c).



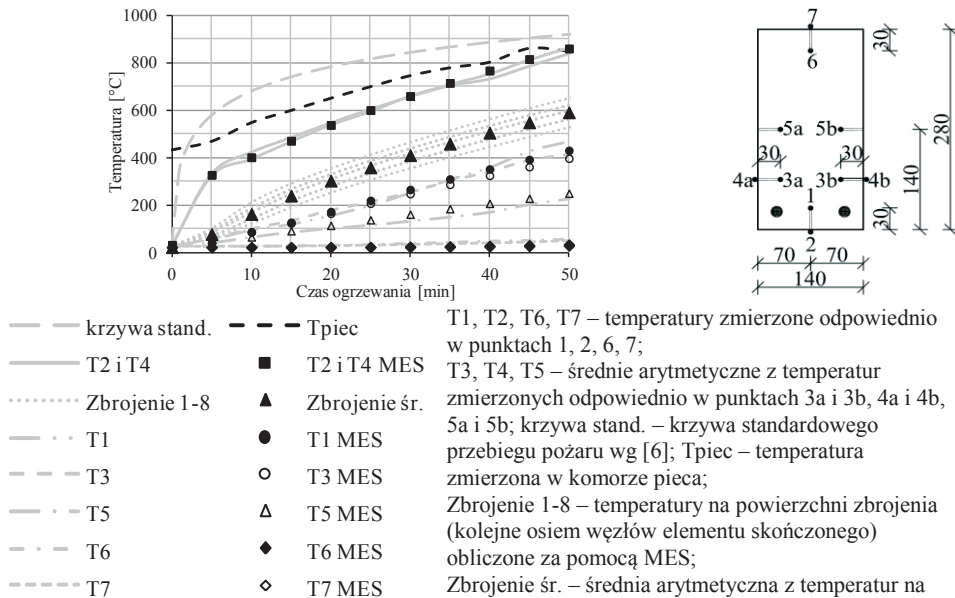
Rys. 3. Właściwości termiczne betonu wg [1]: a) przewodność cieplna, b) ciepło właściwe, c) strefa przekroju belki objęta ogrzewaniem

Na rys. 4 przedstawiono położenie izoterm w przekroju rozpatrywanego elementu po czasie ogrzewania wynoszącym odpowiednio: 15, 30, 45 i 60 minut. Należy tu przypomnieć [3], iż czas badania, po którym następowało zniszczenie belek wynosił maksymalnie 50 minut, w przypadku gdy wyężenie elementu było na poziomie 50% siły niszczącej oraz – 40 minut w przypadku wyężenia 70%.

Na rys. 5 podano porównanie wyników badań i obliczeń MES, których zgodność uznano za wystarczająco dobrą do wyznaczenia temperatury panującej w środku prętów zbrojeniowych. Przy okazji warto tu zwrócić uwagę na różnice temperatury występującej w poszczególnych węzłach oddalonych o zaledwie 0,5 cm od teoretycznego środka pręta. Wynosiły one ponad 100°C , co potwierdza obawy przedstawione na początku tego rozdziału.



Rys. 4. Położenie izoterm w przekroju belki 140 x 280 mm po czasie wynoszącym: a) 15 min, b) 30 min, c) 45 min, d) 60 min; badanie trwało maksymalnie 50 minut (Przecięcia linii wyznaczają położenie węzłów siatki usytuowanych w rozstawie wynoszącym 1 cm)

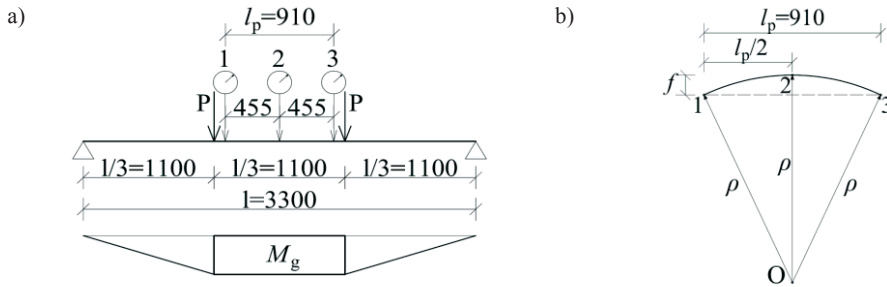


Rys. 5. Temperatura w przekroju belek – porównanie wyników badań i obliczeń

4. Określenie sztywności przekroju na podstawie pomiarów ugięcia w trzech punktach ogrzewanego odcinka belki

W pracy [3] podano wykresy względnego zmniejszenia sztywności ogrzewanego odcinka badanych belek, w zależności od czasu działania wysokiej temperatury. Sztywność przekroju oszacowano wtedy na podstawie wyników pomiaru maksymalnego ugięcia elementu, wykorzystując wzór Maxwella-Mohra oraz założenia zaczerpnięte z [7].

W tym referacie sztywność przekroju na ogrzewanym odcinku badanej belki oszacowano na podstawie wyników pomiarów ugięcia. Ich wartości mierzono za pomocą czujników indukcyjnych umieszczonych w trzech punktach, których usytuowanie przedstawiono na rys. 6a.



Rys. 6. a) Schemat statyczny i rozmieszczenie punktów pomiaru ugięcia (1, 2, 3), b) związki geometryczne w zginanej belce; f – strzałka ugięcia, ρ – promień krzywizny, $1/\rho$ – krzywizna,

l_p – długość odcinka pomiarowego, M_g – wartość momentu zginającego na ogrzewanym odcinku belki

Przyjmując w uproszczeniu, że oś odkształcona badanego odcinka belki jest częścią okręgu (rys. 6b) można zapisać zależność:

$$\left(\frac{l_p}{2}\right)^2 + (\rho - f)^2 = \rho^2, \tag{1}$$

z której po uwzględnieniu kolejnego uproszczenia, iż wartość f^2 jest na tyle mała, że może być pominięta otrzymuje się:

$$\frac{1}{\rho} \approx \frac{8f}{l_p^2}. \tag{2}$$

Biorąc pod uwagę, że na środkowym, ogrzewanym odcinku belki występuje czyste zginanie prawdziwa jest zależność:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_g}{B}. \tag{3}$$

Po podstawieniu i przekształceniu wzorów (2) i (3) otrzymano wyrażenie, z którego można obliczyć sztywność przekroju w temperaturze pokojowej $B_{t=0}$ oraz sztywność przekroju w wysokiej temperaturze B_t . W celu określenia względnego obniżenia sztywności $B_t/B_{t=0}$ wartości strzałki ugięcia w temperaturze pokojowej ($f_{t=0}$) podzielono przez wartości strzałki ugięcia w wysokiej temperaturze (f_t):

$$\frac{B_t}{B_{t=0}} = \frac{f_{t=0}}{f_t}. \tag{4}$$

Tabela 1. Średnie wartości strzałki ugięcia f dla poszczególnych serii badanych belek

Serie belek	Średnia wartość strzałki ugięcia f [mm] po czasie ogrzewania t [min]										
	Czas ogrzewania [min]										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\rho_f=0,44\%$, wyteżenie 50%	1,03	1,43	1,97	2,43	3,02	3,61	4,15	4,65	5,17	6,96	10,38
$\rho_f=0,44\%$, wyteżenie 70%	1,29	1,74	2,27	2,74	3,23	4,00	4,82	5,98	9,04		
$\rho_f=1,13\%$, wyteżenie 50%	0,98	1,34	1,76	2,14	2,47	2,73	3,01	3,36	3,85	4,82	10,81
$\rho_f=1,13\%$, wyteżenie 70%	1,51	1,81	2,16	2,50	2,99	3,60	4,65	6,17	3,76		

Wartość f obliczono z zależności:

$$f = f_2 - \frac{f_1 + f_3}{2}, \tag{5}$$

w której: f_1, f_2, f_3 są wartościami ugięcia pomierzonego w punktach 1, 2 i 3 (rys. 6).

W tabeli 1 podano uśrednione wartości strzałki ugięcia f obliczonej ze wzoru (5) na podstawie wyników pomiarów dla poszczególnych serii belek.

5. Określenie zmniejszenia sztywności przekroju w zależności od temperatury zbrojenia według wymagań Eurokodu

Zastępczą sztywność przekroju zginanego elementu żelbetowego można obliczyć ze wzoru [7]:

$$B = \frac{1}{\frac{1-\zeta}{B_I} + \frac{\zeta}{B_{II}}}, \quad (6)$$

w którym symbole B_I , B_{II} oznaczają odpowiednio sztywności przekroju obliczone według teorii fazy I i II, a ζ – współczynnik dystrybucji, zależny od wartości naprężeń w zbrojeniu rozciągającym.

W celu określenia sztywności przekroju przed ogrzewaniem skorzystano ze wzoru (6) przyjmując wartości charakterystyk geometrycznych oraz właściwości mechanicznych betonu i stali zbrojeniowej w temperaturze pokojowej.

W przypadku gdy ogrzewana jest strefa rozciągana belki, wzrasta temperatura zbrojenia, które jest już wyteżone. Całkowite odkształcenie zbrojenia jest zatem sumą odkształcenia od obciążeń zewnętrznych ($\varepsilon_{s,\sigma}$) oraz swobodnego odkształcenia termicznego ($\varepsilon_{s,\theta}$). Sumę tych odkształceń obliczono na podstawie modeli podanych w [1] w zależności od temperatury zbrojenia zaczerpniętej z rys. 5 (trójkąty). Następnie obliczono sieczny moduł sprężystości stali i współczynnik $\alpha_{e,fi}$:

$$\alpha_{e,fi} = \frac{E_{s,fi}}{E_{cm}}. \quad (7)$$

Przykładowe wyniki obliczeń całkowitego odkształcenia zbrojenia oraz wartości współczynnika $\alpha_{e,fi}$ dla jednej serii belek przedstawiono w tabeli 2.

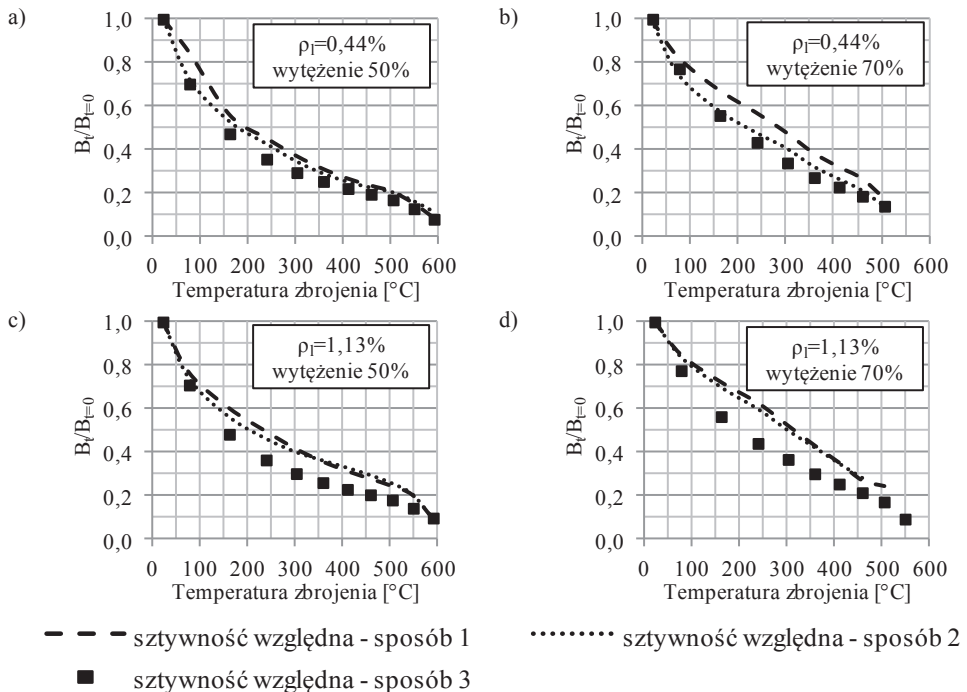
Tabela 2. Przykładowe (dla wybranej serii) wyniki obliczeń odkształcenia zbrojenia $\varepsilon_{s,tot}$ oraz wsp. $\alpha_{e,fi}$

Serie belek	Czas ogrz. [min]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
	Temperatura zbrojenia [°C]	22	78	162	240	303	359	411	459	505	549	591
$\rho_f=0,44\%$, wyteżenie 50%	$\varepsilon_{s,\sigma}$ [‰]	1,39	1,39	1,47	1,58	1,70	1,81	2,03	2,35	2,97	5,52	13,02
	$\varepsilon_{s,\theta}$ [‰]	0,00	0,72	1,81	2,87	3,76	4,58	5,37	6,11	6,84	7,55	8,25
	$\varepsilon_{s,tot}$ [‰]	1,39	2,11	3,28	4,45	5,46	6,39	7,40	8,46	9,81	13,07	21,27
	$\alpha_{e,fi}$ [-]	5,96	3,93	2,50	1,82	1,47	1,25	1,08	0,94	0,81	0,61	0,37

Względne obniżenie sztywności przekroju, spowodowane działaniem wysokiej temperatury określono, wykorzystując wzór (6), jako stosunek zastępczej sztywności występującej w przekroju ze zbrojeniem rozgrzanym do wysokiej temperatury do zastępczej sztywności w temperaturze pokojowej ($B_f/B_{f=0}$).

6. Porównanie sztywności określonej na podstawie wyników badań ze sztywnością obliczoną według Eurokodu

Na rys. 7 przedstawiono wykresy względnego obniżenia sztywności przekroju w zależności od temperatury zbrojenia. Na osi pionowej odłożono wartości sztywności względnej obliczonej trzema sposobami: (1) na podstawie pomierzonych wartości maksymalnego ugięcia belki, ze wzoru Maxwella-Mohra, (2) na podstawie wyników pomiarów ugięcia dokonanych w trzech punktach, (3) według wymagań Eurokodów [1, 7], na podstawie obliczonej temperatury zbrojenia, zaczerpniętej z rys. 5.



Rys. 7. Wykresy względnego obniżenia sztywności przekroju z ogrzewanym zbrojeniem: a) $\rho_f=0,44\%$, wyteż. 50%, b) $\rho_f=0,44\%$, wyteż. 70%, c) $\rho_f=1,13\%$, wyteż. 50%, d) $\rho_f=1,13\%$, wyteż. 70%;

Względne obniżenie sztywności przekroju (rys. 7) określone na podstawie wyników badań dwoma sposobami tzn. „z maksymalnego ugięcia” oraz „z ugięć w trzech punktach badanego odcinka” okazały się bardzo zbliżone do siebie. Względne obniżenie sztywności badanych belek, obliczone na podstawie wymagań Eurokodów [1, 7], przebiegało szybciej (tzn. przy niższej temperaturze zbrojenia), niż określone na podstawie wyników badań.

Względna wartość obniżenia sztywności praktycznie nie zależała od stopnia zbrojenia belek. Była ona natomiast zależna od ich wyteżenia. W belkach mniej wyteżonych (50% siły niszczącej) już przy temperaturze zbrojenia zawierającej się w przedziale od 150 do 250°C wystąpiło obniżenie sztywności o około 50%. W belkach bardziej wyteżonych (70% siły niszczącej) obniżenie sztywności o 50% występowało przy wyższej temperaturze zbrojenia zawierającej się w przedziale od 250 do 300°C.

Belki mniej wyteżone (50% siły niszczącej) uległy zniszczeniu przy temperaturze zbrojenia wynoszącej około 600°C, a belki bardziej wyteżone (70% siły niszczącej) – około 500 - 550°C.

7. Podsumowanie

W pracy, na podstawie wyników pomiaru temperatury w wybranych miejscach przekroju, określono jej wartość w punktach odpowiadających położeniu środka przekroju prętów. Różnice wartości temperatury występującej w węzłach oddalonych od teoretycznego środka pręta o zaledwie 5 mm wynosiły ponad 100°C. Potwierdza to obawy, iż wyniki pomiaru temperatury zbrojenia przeprowadzonego za pomocą termopar umieszczonych na powierzchni prętów mogą być nieadekwatne.

Obniżenie sztywności przekroju określone na podstawie wyników badań dwoma sposobami (maksymalnego ugięcia i ugięć w trzech punktach badanego odcinka) było praktycznie jednakowe, mniejsze od obliczonego na podstawie wymagań Eurokodu.

W elementach zginanych, z ogrzewaną rozciąganą strefą przekroju, po wystąpieniu temperatury zbrojenia w przedziale od 150 do 300°C, należy się spodziewać dwukrotnego zmniejszenia sztywności.

Literatura

- 1 PN-EN 1992-1-2:2008. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-2: Reguły ogólne - Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.
- 2 fib Bulletin 38/2007. Fire design for concrete structures – materials, structures and modelling.
- 3 Głowacki M., Abramowicz M., Kowalski R.: Badania wpływu wysokiej temperatury na sztywność belek żelbetowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 283 Budownictwo i Inżynieria Środowiska z. 59 (nr 3/2012/II) (2012) str. 69-76.
- 4 fib Bulletin 46/2008. Fire design of concrete structures – structural behaviour and assessment.
- 5 Kowalski R., Urbański M.: Redistribution of bending moments in multi-span R/C beams and slabs subjected to fire. 7th International Conference AMCM, Kraków 2011, p. 325-326.
- 6 PN-EN 1991-1-2. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-2: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru.
- 7 PN-EN 1992-1-1;2008. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

The influence of reinforcement temperature on stiffness of reinforced concrete beams in fire conditions

Michał Głowacki¹, Marian Abramowicz², Robert Kowalski³

^{1,3} *Institute of Building Engineering, Faculty of Civil Engineering, Warsaw University of Technology, e-mail: m.glowacki@il.pw.edu.pl, r.kowalski@il.pw.edu.pl*

² *Construction Safety Department, Fire Safety Engineering Faculty, School of Fire Service in Warsaw, e-mail: mabramowicz@sgsp.edu.pl*

Abstract: This paper describes the analysis of high temperature influence on beams with heated tensile zone. High temperature experiments were performed under the static load of 50 or 70% of the destructive force ensuring constant value of bending moment in the central part of the heated beam. Beams with 2 reinforcement ratios – 0.44 and 1.13% were examined. In total four series of beams, three in each series (12 elements) were used. This paper analyses the reduction of relative beam cross section stiffness depending on reinforcement temperature. Experimentally obtained stiffness values calculated in two ways (element maximal deflection and deflection measured in three points of analysed element) were compared to calculation results made according to Eurocode. The performed analysis shows that reduction of the stiffness of element based on Eurocode calculations is slightly bigger than the experimentally obtained one.

Keywords: reinforced concrete beams, deflection, curvature, stiffness, high temperature