© by Wydawnictwo CNBOP-PIB
Please cite as: BiTP Vol. 43 Issue 3, 2016, pp. 95–104

DOI: 10.12845/bitp.43.3.2016.9

mgr inż. **Wojciech Szymkuć**[1]
dr hab. inż. **Adam Glema**, prof. PUT[1]
mgr inż. **Michał Malendowski**[1]

Przyjęty/Accepted/Принята: 17.05.2016;
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 05.09.2016;
Opublikowany/Published/Опубликована: 30.09.2016;

Odporność ogniowa słupów stalowych i żelbetowych nagrzewanych z mniej niż czterech stron[2]

Fire Resistance of Steel and Reinforced Concrete Columns Exposed to Fire on Less Than Four Sides

Огнестойкость стальных и железобетонных колонн, обогреваемых с менее четырех сторон

ABSTRAKT

Wprowadzenie: W artykule przedstawiono problemy związane z odpornością ogniową słupów stalowych i żelbetowych nagrzewanych z mniej niż czterech stron, z uwzględnieniem elementów wbudowanych w ściany oddzielenia przeciwpożarowego. Jednostronne nagrzewanie słupa sprawia, że na jego przeciwległych stronach występują różne temperatury. Prowadzi to do powstawania przemieszczeń poziomych, które wywołują dodatkowe siły wewnętrzne w samym słupie, jego zamocowaniu oraz w przylegającej konstrukcji.
Metody: W odniesieniu do słupów stalowych wskazano, że w normie PN-EN 1993-1-2 brakuje metod uproszczonych pozwalających na obliczenie nośności słupów stalowych poddanych oddziaływaniu wysokiej temperatury tylko z jednej strony. Opisano najważniejsze wnioski z prac badawczych przeprowadzanych w tym obszarze w ostatnich latach i wskazano możliwą do zastosowania metodę obliczania nośności tego typu elementów, uwzględniającą nierównomierny przebieg temperatury w elemencie. Tego typu nagrzewanie i związana z nim nierównomierna temperatura w obrębie przekroju sprawiają, że stal, w zależności od jej położenia w przekroju, wykazuje różne wartości parametrów takich jak granica plastyczności i moduł sprężystości. Uwzględnienie w obliczeniach rzeczywistej temperatury stalowego słupa pozwala na oszacowanie jego przemieszczeń, wywołanych wpływem nierównomiernej temperatury, od których zależą wielkości sił wewnętrznych i jego nośność.
W odniesieniu do słupów żelbetowych opisano podstawowy podział metod obliczania nośności zawartych w PN-EN 1992-1-2, ze szczególnym zwróceniem uwagi na ich ograniczony zakres stosowania z uwagi na: typ konstrukcji, długość elementu, smukłość oraz wielkość mimośrodu obciążenia. Dokonano przeglądu metod pod kątem stosowania ich przy narażeniu na działanie ognia z mniej niż czterech stron. Przybliżono metodę zawartą w niemieckim załączniku krajowym do DIN-EN 1992-1-2, która pozwala na obliczenie nośności słupów wspornikowych poddanych działaniu ognia z jednej, trzech lub czterech stron. Przywołano pozycje literaturowe podające uproszczone metody obliczeń wraz z wnioskami.
Dyskusja i Podsumowanie: Spośród potencjalnych rozwiązań omawianego problemu można wyróżnić: umieszczenie słupów poza ścianą oddzielenia pożarowego, zaprojektowanie połączenia pozwalającego na zawalenie się konstrukcji dachu do wnętrza hali, bez wywoływania nadmiernych sił poziomych oddziałujących na głowicę słupa lub wykorzystanie usztywnienia przylegającej konstrukcji do przeniesienia sił poziomych. Z uwagi na poziom skomplikowania bardziej zaawansowanych metod obliczania nośności, wskazane jest opracowanie metod uwzględniających nierównomierne nagrzewanie w sposób uproszczony, na bazie faktycznych przypadków pożarów budynków.

Słowa kluczowe: odporność ogniowa, słup poddany działaniu ognia, ściana oddzielenia przeciwpożarowego, pożar, temperatura
Typ artykułu: artykuł przeglądowy

ABSTRACT

Introduction: The paper describes problems associated with fire resistance of steel and reinforced concrete columns exposed to fire on less than four sides (such as embedded in firewalls). One-sided exposure is associated with varying temperatures on both sides of the column, which leads to the formation of lateral displacement, causing additional forces in the column, its fixing and in the adjacent structure.
Methods: Steel columns: It is emphasised that in PN-EN 1993-1-2 there are no simplified methods which allow to calculate the load-bearing capacity of columns exposed to fire on one side. The article describes the most important conclusions of research work carried out in recent years with an indication of a potential method for calculating load-bearing capacity of such elements, which allows to take into consideration the uneven temperature in a given element. This type of heating and uneven temperature within the cross-section resulting from it, is associated with the variation of material parameters such as yield strength and elasticity modulus depending on location in the cross-section.

[1] Politechnika Poznańska / Poznan University of Technology; wojciech.szymkuc@put.poznan.pl;
[2] Procentowy wkład merytoryczny w opracowanie artykułu / Percentage contribution: W. Szymkuć – 70%, A. Glema – 15%, M. Malendowski – 15%;

DOI:10.12845/bitp.43.3.2016.9

Reinforced concrete columns: Basic division of methods provided by PN-EN 1992-1-2 is described with special emphasis on scope of its application limited by: the type of construction, the length of the element, its slenderness and the load eccentricity. A review of methods was performed in terms of their application when exposed to fire on less than four sides. A method in the German National Annex to DIN EN 1992-1-2 is described in detail; it allows to calculate the capacity of the load-bearing capacity of cantilever columns exposed to fire from one, three or four sides. Simplified additional methods from literature are briefly described along with their conclusions.
Discussion and Conclusions: The following can be distinguished among potential solutions to the problem: placing the columns outside the firewall, designing a special connection which allows the roof structure to collapse into the warehouse without causing excessive horizontal forces acting on the column or using bracing of the adjacent structure to transfer horizontal forces. However, due to the complexity of more sophisticated methods, it would be advisable to develop methods taking into account uneven exposure in a simplified manner, based on actual cases of fires in buildings.

Keywords: fire resistance, column exposed to fire, fire wall, fire, temperature
Type of article: review article

АННОТАЦИЯ

Введение: В статье представлены проблемы, связанные с огнестойкостью стальных и железобетонных колонн, обогреваемых с менее четырех сторон, в том также их элементов, встроенных в противопожарные стены. Односторонний нагрев, связанный с присутствием разных температур по обеих сторонах колонны, приводит к образованию горизонтального перемещения, в результате чего возникают дополнительные внутренние силы относительно эксцентриситета как в самой в колонне, так и в ее креплении (изгибающий момент) и прилегающей к ней конструкции.
Методы: Стальные колонны. Показано, что в стандарте PN-EN 1993-1-2 отсутствуют упрощенные методы расчета, которые позволяли бы определять несущую способность стальных колонн, подвергаемых воздействию высокой температуры с одной стороны. В статье описываются важнейшие заключения из исследовательских работ, проводимых за последние годы, и указан потенциальный метод расчета несущей способности колонн, учитывающий неравномерное распределение температуры в этой конструкции. Этот тип нагрева и возникающая вследствие этого неравномерная температура в сечении влияют на изменение параметров материала, таких как предел пластичности и модуль упругости в зависимости от положения в поперечном сечении. Учет фактической температуры в стальном элементе позволяет оценить перемещение колонны, возникающее под действием неравномерной температуры, которое в свою очередь влияет на величину внутренних сил и его несущую способность.
Железобетонные колонны. Описана основная классификация методов, которые содержатся в PN-EN 1992-1-2, с особым акцентом на их ограниченную область использования из-за: типа конструкции, длины элемента, толщины и величины нагрузки эксцентриситета. Проведен обзор методов, которые необходимо использовать при воздействии огня с менее чем четырех сторон. Был приближен метод, содержащийся в немецком приложении к DIN EN 1992-1-2, который позволяет рассчитать мощность консольных колонн, подвергаемых воздействию огня с одной, трех или четырех сторон. Приведена литература, которая указывает упрощенную методику расчета.
Заключение: Среди возможных решений этой проблемы можно выделить: размещение колонн вне противопожарной стены, проект соединения, позволяющего рухнуть конструкции крыши в глубь зала, не вызывая при этом чрезмерных горизонтальных сил, действующих на верхушку колонны или использование укрепления соседней конструкции для передачи горизонтальных сил. Однако из-за сложности более продвинутых методов, рекомендуется разработка методов, учитывающих неравномерность воздействия температуры в упрощенном порядке, на основе реальных случаев пожаров одноэтажных зданий.

Ключевые слова: огнестойкость, колонна подверженная воздействию огня, противопожарная стена, пожар, температура
Вид статьи: обзорная статья

1. Wprowadzenie

Opisywana w artykule problematyka dotyczy odporności ogniowej stalowych i betonowych słupów (w tym także słupów wbudowanych w ściany oddzielenia przeciwpożarowego), które podczas pożaru nagrzewane są z mniej niż czterech stron. Takie warunki nagrzewania wiążą się z niejednakowymi temperaturami po różnych stronach słupa, prowadzącymi do powstawania przemieszczeń poziomych spowodowanych różnym wydłużeniem termicznym włókien po przeciwnych stronach tych konstrukcji (ang. *thermal bowing*).

Słupy wbudowane w ściany oddzielenia przeciwpożarowego muszą spełniać określone wymagania, które przedstawiono w tabeli 1. W odróżnieniu od elementów konstrukcji nośnej, muszą one dodatkowo spełniać kryteria szczelności (E) oraz izolacyjności (I).

Tabela 1. Wymagane klasy odporności ogniowej elementów budynku [1]
Table 1. Required fire resistance classes of selected building elements [1]

klasa odporności pożarowej fire resistance class	A	B	C	D	E
konstrukcja nośna /load-bearing structure	R 240	R 120	R 60	R 30	(-)
ściana oddzielenia pożarowego / fire wall	REI 240	REI 240	REI 120	REI 120	REI 60
konstrukcja dachu / roof structure	R 30	R 30	R 15	(-)	(-)

W rozdziale 2 poddano analizie słupy stalowe. Wskazano na prostą zależność, która pozwala oszacować przemieszczenia w słupie (bez uwzględnienia efektów drugiego rzędu) wywołane różnicą temperatur po obu jego stronach – nagrzewanej i nienagrzewanej. Przytoczono możliwe do zastosowania normowe procedury obliczeniowe [2-3]. Powołano się także na przedstawione w literaturze wyniki badań pomiarów temperatury oraz przemieszczeń dwuteowników wbudowanych w ściany.

W rozdziale 3 dokonano przeglądu norm oraz literatury pod kątem słupów żelbetowych poddanych oddziaływaniu wysokiej temperatury z mniej niż czterech stron.

W odniesieniu do nagrzewania według warunków standardowych (ISO) zmianę temperatury w czasie należy rozumieć jako zgodną z krzywą standardową, wyrażoną wzorem:

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1)$$

Gdzie: θ_g to temperatura gazów w stopniach Celsjusza, a t to czas oddziaływania w minutach.

2. Słupy stalowe

W słupach wbudowanych w ściany oddzielenia przeciwpożarowego pod wpływem pożaru dochodzi do nierównomiernego przebiegu temperatury w przekroju poprzecznym, który prowadzi do zjawiska wygięcia elementu. Schematycz-

nie przedstawiono je na ryc. 1. W prostych przypadkach przemieszczenia poziome wywołane tym zjawiskiem można opisać za pomocą wzoru:

$$D = \frac{\Delta\varepsilon_{th} \cdot l^2}{n \cdot d} \quad (2)$$

Gdzie:
$\Delta\varepsilon_{th}$ to różnica wydłużenia włókien od temperatury po obu stronach słupa stalowego,
l to długość słupa,
d odległość między skrajnymi włóknami (nagrzewanymi i nienagrzewanymi)
n to współczynnik przyjmujący wartość 2 dla słupów wspornikowych lub 8 dla słupów podpartych obustronnie przegubowo.

Wydłużenie stali według Eurokodów może być wyznaczane ze wzorów:

- dla temperatur od 20 do 750°C:

$$\varepsilon_{th}(\theta) = -2{,}416 \cdot 10^{-4} + 1{,}2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta + 0{,}4 \cdot 10^{-8} \cdot \theta^2$$

- dla temperatur od 750 do 860°C:

$$\varepsilon_{th}(\theta) = 11 \cdot 10^{-3}$$

- dla temperatur od 860 do 1200°C:

$$\varepsilon_{th}(\theta) = -6{,}2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta$$

Przemieszczenie poziome na ryc. 1. obliczono przy założeniu braku obciążenia (brak efektów II rzędu) oraz liniowego przebiegu temperatury w przekroju. W przypadku słupów podpartych obustronnie przegubowo przemieszczenie dotyczy środka wysokości (l/2) słupa, natomiast w przypadku elementów wspornikowych – jego wolnego końca (l).

2.1. Aktualny stan normalizacji

Proste modele obliczeniowe zawarte w Eurokodzie 3 [2] pozwalają na obliczenie wartości temperatury elementów stalowych przy założeniu równomiernej temperatury w całym przekroju. Przykładowe wyniki obliczeń temperatury kształtownika HEA200 o różnej ekspozycji zestawiono na ryc. 2. O ile w przypadku nagrzewania elementu ze wszystkich stron wyniki są zbliżone do rzeczywistych, to w przypadku trzech stron założenie jednorodnej temperatury w całym przekroju nie jest precyzyjne. Eurokod 3 pozwala na uwzględnienie tego efektu w przypadku elementów zginanych poprzez zwiększenie obliczeniowej nośności przy zginaniu $M_{fi,t,Rd}$ przez zastosowanie współczynnika $1/\kappa_1$. Dla belki nieosłoniętej materiałami izolacji ogniochronnej, przylegającej do płyty stropowej (ryc. 2), $M_{fi,t,Rd}$ można zwiększyć o blisko 43%. (κ_1 = 0,7). Eurokod 4 [3] pozwala na obliczenie zróżnicowanej temperatury w elemencie przylegającym do stropu lub ściany wzdłuż jednej z krawędzi, co za tym idzie, także na dokładniejsze obliczenie nośności elementu. W efekcie obliczeń zgodnych z [3] otrzymuje się różne temperatury półki przylegającej do przegrody, środnika i półki od strony pomieszczenia.

Wzrost temperatury przedstawiony na ryc. 2 obliczono przy założeniu, że wskaźnik ekspozycji przekroju (A_m/V) wynosi:

$\frac{L}{A}$ w przypadku nagrzewania z 4 stron,

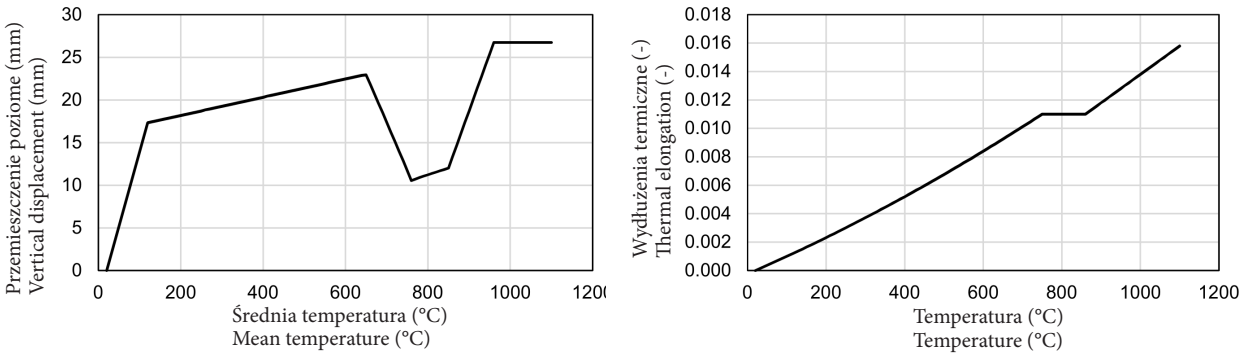
$\frac{L-b}{A}$ w przypadku nagrzewania z 3 stron,

$\frac{b+2t_f}{b \cdot t_f}$ w przypadku nagrzewania z 1 strony.

Gdzie:
L to obwód kształtownika,
A – pole,
b – szerokość stopki,
t_f – grubość stopki.

Jednocześnie dla nagrzewania z czterech lub trzech stron przyjęto współczynnik poprawkowy związany z efektem zacienienia k_{sh} = 0,9, podczas gdy w przypadku nagrzewania z jednej strony przyjęto k_{sh} = 1,0. Właściwości stali przyjęto zgodnie z [2], natomiast emisyjność stali przyjęto jako 0,8.

Model służący do obliczania temperatur elementów stalowych w normie Eurokod 3 [2] nie uwzględnia przepływu ciepła z elementu stalowego do przylegającej ściany lub stropu. Należy szczególnie mocno zaznaczyć, że wyniki dla jednostronnego nagrzewania będą prawidłowe jedynie dla odizolowanej z jednej strony półki kształtownika (lub dla odizolowanego z jednej strony płaskownika) – co efektywnie sprowadzi się do nagrzewania prostokątnego przekroju (półka kształtownika) z 3 stron. W związku z tym, że Eurokod nie uwzględnia przepływu ciepła ani do wnętrza ściany, ani do wbudowanej w ścianę części elementu, oparcie obliczeń temperatury całego kształtownika o obliczoną temperaturę półki prowadzi do znacznego przeszacowania temperatury (por. ryc. 2 i ryc. 3).

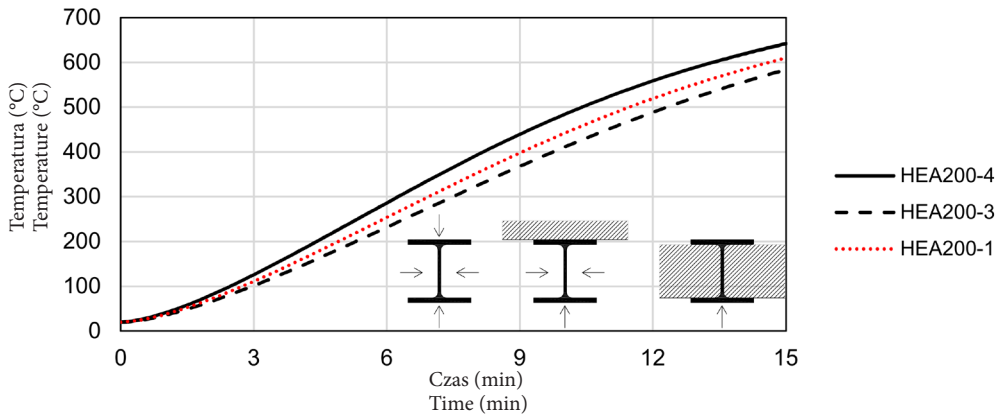


Ryc. 1. Przemieszczenie poziome słupa stalowego (zamocowanie obustronnie przegubowe, d = 168.3 mm, l = 3000 mm), pod wpływem różnicy temperatur z obu stron równej 200°C oraz funkcja wydłużenia termicznego stali [2]. Początek wykresu po lewej stronie wynika z założonego początkowego jednostronnego zwiększania temperatury z 20 do 220°C

Fig. 1. Horizontal displacement of steel column (simply supported, d = 168.3 mm, l = 3000 mm), caused by temperature difference on opposite sides equal to 200°C and function of thermal elongation of steel [2]. The beginning of the figure on the left is a result of assumed initial increase of temperature on one side only from 20 to 220°C

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

DOI:10.12845/bitp.43.3.2016.9



Ryc. 2. Wzrost temperatury przy założeniu nagrzewania według krzywej (1) kształtownika HEA 200 z czterech, trzech lub jednej strony, obliczenia według 2
Fig. 2. Temperature increase assuming HEB 200 profile is exposed to standard fire (1) on four, three or one side, calculations according to [2]
Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

2.2. Wyniki badań z literatury

Wśród proponowanych w ostatnim czasie zmian warto podkreślić pracę doktorską i serię artykułów, które opracował A.M. Correia [4]. Badał on słupy stalowe wbudowane w ściany w różnych konfiguracjach (m.in. z pasami równolegle lub prostopadle do lica ściany). Jedną z istotniejszych prac w tym zakresie jest [5], w której autorzy przedstawiają wniosek, że określanie temperatury całego elementu na podstawie temperatury części nieosłoniętej prowadzi do nieekonomicznych rezultatów, natomiast przyjmowanie temperatury średniej jest niebezpieczne ze względu na pominięcie efektu wygięcia wywołanego temperaturą (ryc. 1.). Autorzy opracowali serię interakcji momentu zginającego i siły normalnej, a zaproponowana procedura ma szanse na uznanie jej jako obowiązującą przez Europejski Komitet Normalizacyjny i jej implementację w kolejnej generacji Eurokodów. Rycina 3 przedstawia wyniki pomiarów temperatury w przekroju poprzecznym kształtownika HEA 200 ze ścianą wbudowaną między półki, przy nagrzewaniu według krzywej standardowej. Różnica temperatur po obu stronach ściany po 60 minutach nagrzewania wynosi 600°C. W przypadku obliczeń dotyczących ściany oddzielenia pożarowego, należałoby uwzględnić także kryteria związane z izolacyjnością przegrody z wbudowanym w nią elementem stalowym. Potencjalnym problemem może być prawidłowe wypełnienie przestrzeni między murem a kształtownikiem.

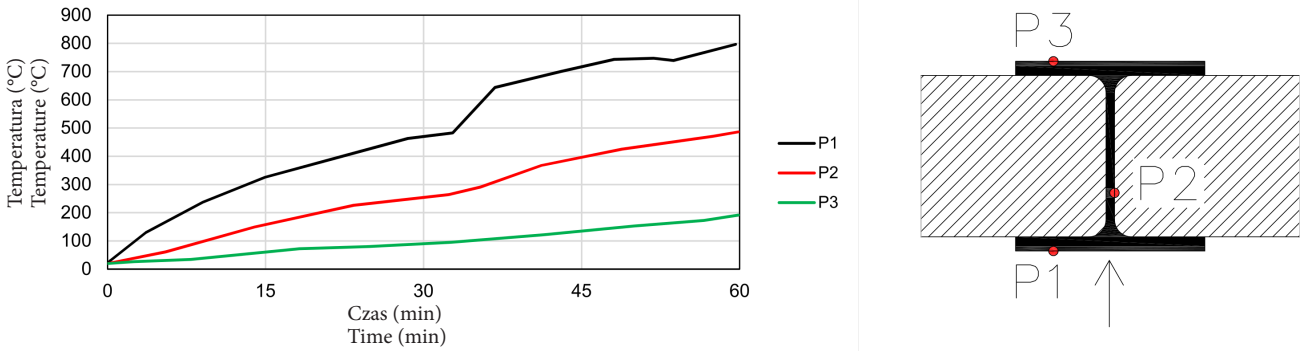
Do istotnych wniosków z pracy [4] należą:

- Eurokod bazuje na jednorodnej temperaturze w przekroju, a temperatura ta jest inna niż zaobserwowana w rzeczywistości,
- rzeczywisty rozkład temperatury jest nieliniowy, a co najważniejsze, występuje duża różnica między temperaturą półki narażonej bezpośrednio na działanie pożaru a półki po drugiej stronie ściany, którą przedstawiono na ryc. 3.

W pracach [4-5] rozpatrywano dwuteowniki o różnym usytuowaniu względem lica ściany. Przedstawiono tam praktyczne zalecenia dotyczące ustalania temperatury poszczególnych części przekroju oraz temperatury „zastępczej", na podstawie której można określić przybliżone diagramy interakcji M/N, pozwalające na określenie odporności ogniowej.

Zjawiska zachodzące w elementach poddanych nierównomiernemu nagrzewaniu, takie jak zmiana położenia efektywnego środka przekroju, czy też osi obrotu plastycznego opisano m.in. w [6] oraz [7]. W pracy [7] analizowany jest przypadek, w którym temperatura jest niejednorodna zarówno w przekroju słupa, jak i względem jego wysokości. W przypadku nierównomiernego nagrzewania parametry te zmieniają się wraz ze zmianą temperatury, z uwagi na zróżnicowaną w obrębie przekroju degradację parametrów materiałowych, takich jak granica plastyczności, czy moduł Younga [8].

Dodatkowe informacje można znaleźć w raporcie RFCS [9]. Podano tam uproszczone procedury szacowania przemieszczeń i sił wewnętrznych w konstrukcji, gdy w jednej z naw ramy wielonawowej wystąpi pożar. Problem podzielono tam na dwa etapy:



Ryc. 3. Temperatury zmierzone w trzech punktach przekroju poprzecznego kształtownika stalowego wbudowanego w ścianę. Wyniki badań [4]
Fig. 3. Temperatures measured at three points of the steel cross-section embedded in wall. Test results [4]

- etap I: zmiana sił wewnętrznych i przemieszczenia spowodowane wydłużalnością termiczną,
- etap II: wyczerpanie nośności dźwigara: wyznaczenie sił poziomych oddziałujących na słupy na podstawie rozwiązania krzywej łańcuchowej.

3. Słupy żelbetowe

3.1. Przegląd metod sprawdzania odporności ogniowej w Eurokodzie 2

Norma PN-EN 1992-1-2 [10] zawiera szereg metod pozwalających na określenie, czy słup żelbetowy pod zadanym obciążeniem spełni wymagania określonej klasy odporności ogniowej. Metody zawarte w normie dzielą się na 3 kategorie:

1. metody tabelaryczne:
   a) metoda A,
   b) metoda B,
   c) metoda z załącznika C.
2. metody uproszczone:
   a) metoda z załącznika B.1 – izotermy 500°C,
   b) metoda z załącznika B.2 – strefowa,
   c) metoda z załącznika B.3 – oparta na oszacowaniu krzywizny.
3. metody zaawansowane – do których podano ogólne założenia, takie jak parametry materiałowe betonu i stali zbrojeniowej w podwyższonych temperaturach.

Metoda z załącznika C powstała na bazie B.3, natomiast metoda B – to jej uproszczona wersja. W tabeli 2 przedstawiono przegląd ograniczeń wymienionych wyżej metod tabelarycznych i uproszczonych.

3.1.1. Metody tabelaryczne

Używanie metod tabelarycznych wymaga minimalnego wysiłku projektanta, gdyż w założeniu same wyniki obliczeń nośności konstrukcji w trwałych i przejściowych sytuacjach obliczeniowych (STR i EQU) powinny pozwolić na określenie, czy dany element konstrukcji spełnia wymagania założonej standardowej odporności ogniowej (R). Zazwyczaj sprowadza się to do sprawdzenia, czy wymiary przekroju i odległości osiowe głównych prętów zbrojenia są nie mniejsze niż wymagane.

Podczas stosowania metod tabelarycznych dotyczących słupów żelbetowych, należy mieć na uwadze szereg ograniczeń (tabela 2). Przede wszystkim ich stosowanie jest dopuszczalne tylko w przypadku pożarów standardowych. Ponadto w punkcie 5.3.1 normy [10]: w uwadze znajduje się zapis „Dane tabelaryczne dotyczą jedynie konstrukcji usztywnionych. Dane tabelaryczne przeznaczone dla konstrukcji nieusztywnionych można podać w Załączniku krajowym". Jest to bardzo istotny i zbyt często pomijany wymóg. We wszystkich metodach, poza B.1 i B.2, podano wprost, że można je stosować tylko w przypadku konstrukcji usztywnionych [ang. *braced*]. W normie PN-EN 1994-1-2 podano następującą definicję ramy stężonej: „rama wykazująca odporność na przechył dzięki systemowi stężeń, który jest wystarczająco sztywny, aby z wystarczającą dokładnością móc założyć, ze wszystkie siły poziome zostaną przeniesione przez system stężeń".

W przypadku wykorzystywania metod tabelarycznych, zawierających ograniczenie mimośrodu pierwszego rzędu *e*, należy pamiętać, że efekty pierwszego rzędu są obliczane z uwzględnieniem imperfekcji geometrycznych. Z kolei na korzyść projektanta mogą działać współczynniki ψ, wykoé rzystywane do obliczania kombinacji oddziaływań. Na wartości obliczeniowe oddziaływań w wyjątkowych sytuacjach obliczeniowych (m.in. pożar), według [12] składają się: oddziaływania stałe, wiodące oddziaływanie wyjątkowe oraz towarzyszące oddziaływania zmienne: jedno *główne* i *pozostałe*. W wyjątkowych sytuacjach obliczeniowych obciążeniem wiodącym jest temperatura, spośród towarzyszących *główne* oblicza się ze współczynnikiem $\psi_{1,1}$ (wartość częsta), natomiast *pozostałe* ze współczynnikiem $\psi_{2,1}$ (wartość qu-

Tabela 2. Ograniczenia stosowania metod obliczania słupów w Eurokodzie 2 [10]
Table 2. Limitations of using the calculation methods of columns in Eurocode 2 [10]

Limit:	Metody tabelaryczne Tabular methods			Metody uproszczone Simplified methods		
	A	B	Annex C	B.1 izotermy 500°C / isotherm 500°C	B.2 strefowa / zone	B.3 oszacowania krzywizny / estimation of curvature
max	3 m (tabela/table) 6 m (wzór/ formula)	-	-	-	-	-
	-	30	80	-	-	-
e	(PN/NA)	max (0,25b; 200 mm)	max (0,5b; 200 mm)	-	-	-
Krzywa/ Curve	ISO	ISO	ISO	ISO lub PRM jeżeli	dowolna krzywa pożaru rozwiniętego (zmiana)	ISO, PRM

Oznaczenia: ISO – krzywa standardowa / standard temperature-time curve (1), PRM – krzywa parametryczna / parametric curve, $l_{0,fi}$ – efektywna długość słupa w warunkach pożarowych / effective length of the column under fire conditions, $\lambda_{fi} = l_{o,fi}/i$ – smukłość słupa w warunkach pożarowych / slenderness of the column under fire conditions, *e* – mimośród pierwszego rzędu w warunkach pożarowych / first order eccentricity under fire conditions, *b* i *h* – wymiary poprzeczne przekroju / dimensions of cross-section, O – współczynnik otworów określony przez EN 1991-1-2, załącznik A / opening factor according to EN 1991-1-2, Annex A.

DOI:10.12845/bitp.43.3.2016.9

asi-stała). W przypadku obciążenia wiatrem wartości tych współczynników wynoszą odpowiednio 0,2 oraz 0, co wiąże się z istotną redukcją obciążeń poziomych oddziałujących na konstrukcję w porównaniu do trwałej i przejściowej sytuacji obliczeniowej. Wartości te bazują na częstości występowania danych obciążeń. Wyniki badań w postaci histogramów prędkości wiatru i ciężaru pokrywy śnieżnej na terenie Polski można znaleźć w pracy [11]. Autor tej pracy podaje, że w latach 1976-80 prędkość wiatru w 95% pomiarów nie przekraczała 8 m/s (obecnie w strefie 2, na większości terenu Polski, przyjmuje się wartość podstawowej bazowej prędkości wiatru równą 26 m/s). Z kolei w przypadku obciążenia śniegiem ciężar pokrywy w 93% pomiarów nie przekraczał 0,1 kN/m^2, podczas gdy obecnie na terenie kraju, poza obszarem Tatr wartość charakterystyczna obciążenia śniegiem gruntu wynosi od 0,7 do 1,6 kN/m^2. Na podstawie tego typu danych określono wartości współczynników ψ_1 oraz ψ_2 w normie [12]. Zasady ich wyznaczania można znaleźć m.in. w pracy [13].

3.1.2. Metody uproszczone

Metody uproszczone można stosować w przypadku nagrzewania z mniej niż czterech stron, ale wymaga to uwzględnienia przemieszczeń od temperatury (*thermal bowing*). Stosowanie metod uproszczonych sprowadza się do obliczenia temperatur wewnątrz przekroju i stosowania „konwencjonalnych metod obliczeniowych" do wyznaczania nośności, uwzględniając np. wielkość przekroju zredukowanego i obniżone parametry materiałowe stali zbrojeniowej. Dotychczas w polskiej literaturze brakuje niestety istotnych odniesień do metod, które pozwoliłyby na przeprowadzanie obliczeń w prosty sposób. W przypadku metody B.2 (strefowej) w normie pojawia się pewna nieścisłość, mianowicie w punkcie 4.2.1 Uwaga 1 podano: „Metodę B.1 można stosować zarówno do warunków pożaru standardowego, jak i parametrycznego. Metodę B.2 zaleca się stosować w odniesieniu do małych przekrojów i smukłych słupów, przy czym obowiązuje ona tylko dla pożarów standardowych". Natomiast w załączniku informacyjnym B, w punkcie B.2(1) podano „Metodę strefową można stosować dla dowolnej krzywej pożaru rozwiniętego, jakkolwiek dane w niniejszej normie odnoszą się tylko do pożaru standardowego" (zmiana na mocy PN-EN 1992-1-2:2008/AC).

3.2. Nagrzewanie z mniej niż czterech stron

3.2.1. Eurokod 1992-1-2

Spośród metod tabelarycznych tylko w metodzie A zawarte są wymogi dla słupów poddanych działaniu ognia z jednej strony, przy czym zakres jej stosowania (tabela 2) w wielu przypadkach nie pozwala na jej efektywne stosowanie. W metodzie A (tabela 3) podano minimalne szerokości słupa i odległości osiowej zbrojenia dla warunków nagrzewania:

- z jednej strony, przy μ_{fi} = 0,7,
- z więcej niż jednej strony, przy μ_{fi} = 0,2; 0,5 lub 0,7.

Gdzie: μ_{fi} jest stosunkiem obliczeniowego obciążenia osiowego w sytuacji normalnej do obliczeniowej nośności słupa w warunkach temperatury normalnej.

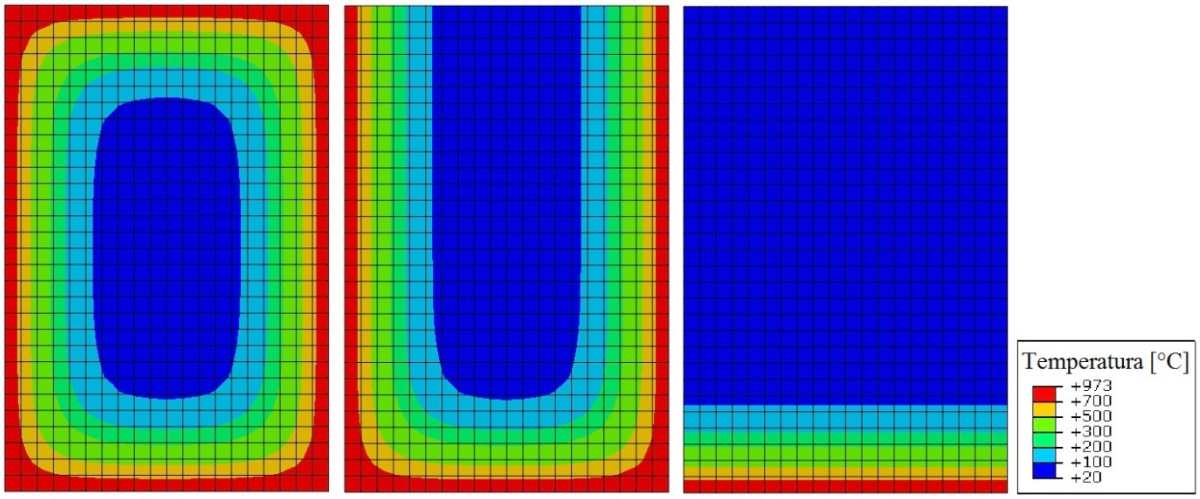
Warto w tym miejscu zaznaczyć, że tabela 3 pojawiła się w innej wersji w prenormie ENV 1992-1-2. Jej centralna część opisana jako „Słupy nagrzewane z więcej niż jednej strony" została zmieniona m.in. po krytyce ze strony Franssena [14], który podnosi też problem niedostępności uzasadnień niektórych metod przyjętych w Eurokodach (tak było w przypadku pierwotnej wersji metody A w ENV). Autorom nie udało się dotrzeć do źródła części zatytułowanej „Nagrzewane z jednej strony", w którym zaprezentowane byłyby wyniki porównania zaproponowanej metody i testów laboratoryjnych lub obliczeń. Metoda A została opracowana na podstawie wyników 88 testów odporności ogniowej słupów żelbetowych, przeprowadzonych w Brunszwiku, Ottawie, Gandawie oraz Liege w latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Ma ona charakter *best fit equation* – równania będącego najlepszym dopasowaniem, stąd ograniczenie do domeny walidacyjnej z testów laboratoryjnych, m.in. w postaci maksymalnego mimośrodu obciążenia. We wzorze wchodzącym w skład metody A nie podano sposobu uwzględnienia jednostronnego nagrzewania.

Metoda B nie rozróżnia między nagrzewaniem z jednej lub więcej stron, z kolei dane zawarte w załączniku C przewidziane są tylko dla słupów nagrzewanych z więcej niż jednej strony.

Temperatury w przykładowym przekroju betonowym o wymiarach 60 x 40 cm, poddanym działaniu wysokiej temperatury przez 120 minut, podano na ryc. 4. Do obliczeń przejęto właściwości materiałowe zgodne z [10]: ciepło właściwe, gęstość i przewodność cieplną. Wzrost tempera-

Tabela 3. Minimalne wymiary i odległości osiowe dla słupów prostokątnych, metoda A [10]
Table 3. Minimum column dimensions and axis distances for rectangular columns, method A [10]

Standardowa odporność ogniowa / Standard fire resistance	Minimalne wymiary (mm) Szerokość słupa b_{min} / odległość osiowa *a* głównych prętów / Minimum dimensions (mm) Column width b_{min} / axis distance *a* of the main bars			
	Słupy nagrzewane z więcej niż jednej strony / Column exposed on more than one side			Nagrzewane z jednej strony / Exposed on one side
	μ_{fi} = 0.2	μ_{fi} = 0.5	μ_{fi} = 0.7	μ_{fi} = 0.7
R30	200/25	200/25	200/32 300/27	155/25
R60	200/25	200/36 300/31	250/46 350/40	155/25
R90	200/31 300/25	300/45 400/38	350/53 450/40**	155/25
R120	250/40 350/35	350/45** 450/40**	350/57** 450/51**	175/35
R180	350/45**	350/63**	450/70**	230/55
R240	350/61**	450/75**	-	295/70
**Minimum 8 prętów / Minimum 8 bars				



Ryc. 4. Temperatury w przekroju słupa po dwóch godzinach nagrzewania według krzywej standardowej (1). Słup poddany działaniu ognia z czterech, trzech oraz jednej strony

Fig. 4. Temperatures inside column cross-section after 2 hours of heating according to standard curve (1). Column exposed to fire on four, three and one side

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

tury przyjęto zgodny z krzywą standardową (1), przy czym w pierwszym przypadku jest to oddziaływanie ze wszystkich stron, a w kolejnych odpowiednio z trzech (boki i dół na ryc. 4) oraz jednego (dół na ryc. 4). Powierzchnie nienagrzewane przyjęto jako idealnie zaizolowane.

3.2.2. Niemiecki załącznik krajowy DIN EN 1992-1-2/NA

W kontekście smukłych słupów poddanych nierównomiernemu nagrzewaniu, interesującą metodą jest zawarta w niemieckim załączniku krajowym DIN-EN 1992-1-2/NA:2010-12 Vereinfachtes Verfahren zum Nachweis der Feuerwiderstandsklasse R 90 von Stahlbeton-Kragstuetzen aus Normalbeton – uproszczona metoda sprawdzenia klasy odporności ogniowej R90 żelbetowych słupów wspornikowych z betonów normalnej wytrzymałości. Umieszczono tam serię nomogramów, na podstawie których można oszacować m. in. maksymalną siłę normalną, którą przeniesie słup po 90 minutach. Metoda została opracowana z myślą o obliczaniu żelbetowych słupów wspornikowych. Dopuszcza ona również obliczenia dla słupów o innych schematach statycznych, nagrzewanych z czterech, trzech lub z jednej strony. Jej istotną wadą, z perspektywy polskich przepisów, jest jej ograniczenie do klasy R 90.

Opisywana metoda podaje dwa warunki:

- Siła oddziaływania w warunkach pożaru musi być nie większa niż nośność słupa ;
- Moment zginający powstający w warunkach pożaru w przekroju utwierdzenia musi być możliwy do przeniesienia przez fundament.

Norma [15] zawiera nomogramy służące do odczytania nośności oraz momentu zginającego w słupach o wysokościach przekroju h = {300 mm, 450 mm, 600 mm, 800 mm}. Każdy z nomogramów został opracowany przy założeniu:

- czterostronnego nagrzewania,
- stosunku odległości osiowej zbrojenia do wysokości przekroju a/h=0,10,
- betonu klasy C30/37,
- stali zbrojeniowej B500, przy geometrycznym stopniu zbrojenia .

Po wyznaczeniu pożądanych wartości z nomogramów, można je modyfikować za pomocą odpowiednich współczynników. Dzięki temu uzyskuje się zakres stosowania podany w tabeli 4, wykraczający poza wymienione wyżej założenia. W porównaniu do metod opisanych w [10] ograniczenia są znacznie mniej restrykcyjne, przede wszystkim dotyczy to smukłości słupów, mimośrodu obciążenia oraz możliwości stosowania w konstrukcjach nieusztywnionych. Na ryc. 5 przedstawiono mnożnik k_{fi} obliczony według [15], zmieniający nośność przekroju w zależności od warunków nagrzewania (1 lub 3 strony), wysokości przekroju oraz mimośrodu obciążenia odniesionego do wysokości przekroju. Bazowa nośność odczytana z nomogramu dla nagrzewania z czterech stron, może być przemnożona przez współczynnik k_{fi} w celu określenia nośności dla innych warunków nagrzewania. Jak widać, według tej metody w przypadku jednostronnego nagrzewania, przy wysokości przekroju do 450 mm, nośność elementu nagrzewanego z jednej strony jest większa niż nagrzewanego ze wszystkich stron. Z kolei w przypadku nagrzewania z trzech stron, nośność jest zredukowana od 20 do 40 % (k_{fi} = 0,6-0,8), zależnie od mimośrodu.

3.2.3. Wyniki badań z literatury

Prawdopodobnie jedyną pracą traktującą o słupach żelbetowych nagrzewanych z trzech stron jest [16]. W pracy zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych słupów o wymiarach 20 x 20 x 200 cm, nagrzewanych z trzech stron.

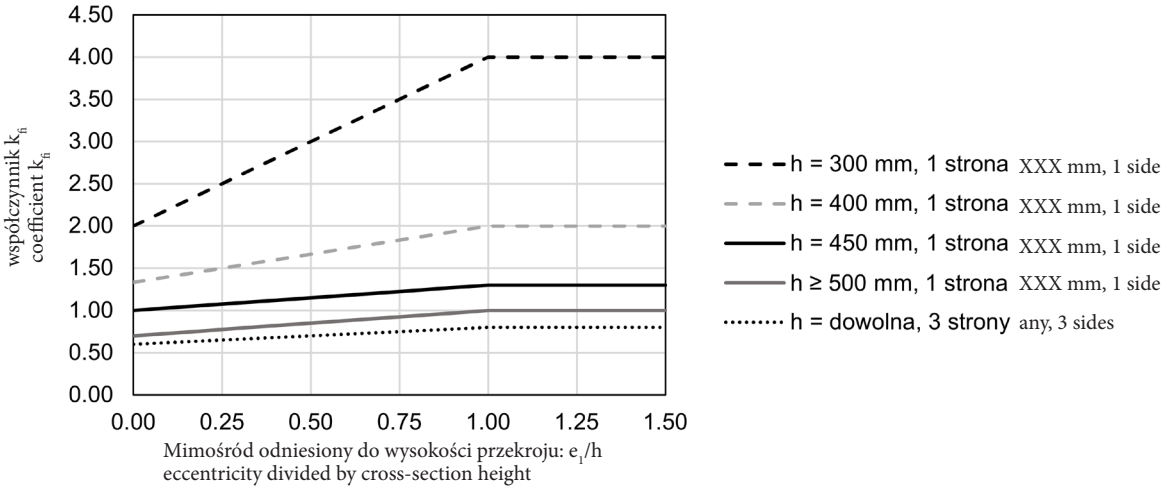
Spośród prac poświęconych obliczaniu czasu odporności ogniowej słupów można wyróżnić [17-18]. W pracy [17] autorzy użyli oprogramowania SAFIR, celem opracowania uproszczonej metody obliczeniowej. Z kolei autorzy pracy [18] bazowali na własnym oprogramowaniu, a w podsumowaniu stwierdzają, że czas odporności ogniowej typowych słupów żelbetowych jest mniejszy o 15, 40 i 10% w porównaniu do elementów nagrzewanych ze wszystkich stron, odpowiednio dla nagrzewania z trzech, dwóch (sąsiednich) lub jednej strony. Są to wnioski różniące się od tych, które opisano w rozdziale 3.2.2, co dowodzi, że temat jest wciąż nierozpoznany.

Przytoczone prace zawierają odniesienia do wyników badań słupów nagrzewanych ze wszystkich stron, ale brak w nich walidacji opracowanych modeli na podstawie testów elementów nagrzewanych z mniej niż czterech stron, np. podanych przez [16]. Korzystne mogłoby być odniesienie do wyników badań żelbetowych ścian, np. [19]. Na uwagę zasługuje praca [20], która podaje porównanie zaproponowanej metody obliczeń słupów żelbetowych z wynikami testów słupów nagrzewanych z trzech stron w [16].

DOI:10.12845/bitp.43.3.2016.9

Tabela 4. Zakres stosowania metody w DIN/NA [15]
Table 4. Application range of the method provided by DIN/NA [15]

Beton / Concrete	na kruszywie krzemianowym klasy C20/25 do C50/60 / siliceous, C20/25 – C50/60
Zbrojenie / Reinforcement	jednowarstwowe walcowane na gorąco B500, klasa N / single layer, B500, class N
Długość wyboczeniowa odniesiona do wysokości przekroju / Buckling length to h ratio	warunek odpowiada smukłości w zakresie / slenderness between:
Mimośród obciążenia odniesiony do wysokości przekroju / Load eccentricity to h ratio	gdzie / where
Minimalny wymiar przekroju [mm] / minimum cross-section dimension [mm]	
Stopień zbrojenia / Geometrical reinforcement ratio (A_s/A_c) [%]	
Położenie zbrojenia odniesione do wysokości przekroju / Axis distance to h ratio	
Oznaczenia: $l_{0,fi}$ – efektywna długość słupa w warunkach pożarowych / effective length of the column under fire conditions, h – wysokość przekroju słupa / height of the cross-section, e_0 – mimośród obciążenia / load eccentricity, e_i – mimośród odzwierciedlający imperfekcję według punktu 5.2 normy [10] / eccentricity according to 5.2 [10], a – odległość osiowa zbrojenia / axis distance of the main bars.	



Ryc. 5. Mnożnik zmieniający nośność przekroju w zależności od warunków nagrzewania (1 lub 3 strony), obliczony według [15]
Fig. 5. Coefficient for determining load-bearing capacity under different fire exposures: three- or one-sided, calculated according to [15]
Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

4. Dyskusja

Istnieje wiele prac dotyczących nierównomiernie nagrzewanych elementów stalowych – zarówno rozpatrujących to zagadnienie w sposób eksperymentalny [4], jak i teoretyczny [6,-7]. Część z nich dotyczy słupów, w których nierównomierny rozkład temperatury jest wynikiem umieszczenia słupa w ścianie [4], inne dotyczą przypadków, w których słupy nie są w całości ogarnięte pożarem [7-8]. Niemniej oba wymienione kierunki prac wiążą się z rozpatrywaniem podobnych efektów w obrębie elementu konstrukcji (przy pominięciu zagadnienia współpracy mechanicznej ściany ze słupem).

W przypadku słupów żelbetowych wnioski płynące z różnych prac są często sprzeczne. Dla jednostronnego nagrzewania Eurokod 2 podaje znacząco mniejsze wymagania, niż w przypadku nagrzewania z więcej niż jednej strony (tabela 3). Według niemieckiego załącznika krajowego, w przypadku przekrojów o wysokości od 300 do 450 mm, nagrzewanych z jednej strony, nośność będzie większa niż w przypadku równomiernego nagrzewania z czterech stron. Przy nagrzewaniu z trzech stron – redukcja nośności w odniesieniu do takiego samego elementu, ale nagrzewanego ze wszystkich stron, wyniesie od 20 do 40% (ryc. 5). Z kolei według pracy [18], czas odporności ogniowej typowych słupów żelbetowych jest mniejszy o 15, 40 i 10 % w porównaniu do elementów nagrzewanych ze wszystkich stron, odpowiednio dla nagrzewania z trzech, dwóch (sąsiednich) lub jednej strony. Bez przeprowadzenia szczegółowych obliczeń niemożliwe jest ilościowe porównanie tych wartości ze względu na użyte w nich dwie różne charakterystyki: nośność w przypadku [15] i czas odporności ogniowej w [18]. Brak spójności nawet kierunku zmian (pogarsza/polepsza) w przypadku nagrzewania jednostronnego jest zastanawiający. Wykorzystanie licznych wyników badań ścian żelbetowych, m.in. [19], byłoby korzystne w celu opracowania bardziej ogólnych wniosków.

Spośród potencjalnych rozwiązań problemu można wyróżnić:

- umieszczenie słupów poza ścianą oddzielenia pożarowego,
- zaprojektowanie połączenia pozwalającego na zawalenie się konstrukcji dachu do wnętrza hali, bez wywoływania nadmiernych sił poziomych oddziałujących na głowicę słupa,
- wykorzystanie usztywnienia przylegającej konstrukcji do przeniesienia sił poziomych.

Praktyczne wytyczne dotyczące pierwszej metody podano m.in. w pracy [21]. Drugi przypadek jest o tyle skomplikowany, że połączenie musi zapewnić przeniesienie obciążeń w warunkach normalnych, a jednocześnie zsunięcie się konstrukcji dachu do wnętrza hali nie może pociągać za sobą uszkodzeń ściany oddzielenia przeciwpożarowego i przylegającej z drugiej strony konstrukcji. Tego rodzaju połączenie musi być w stanie przenieść ewentualne obciążenie od ssania wiatru oraz w jak najmniejszym stopniu przyczyniać się do powstawania sił poziomych w poziomie głowicy słupa, które mogą być spowodowane m.in. ścinaniem śrub lub tarciem. Zarówno słup, jak i stopa fundamentowa powinny być w stanie przenieść dodatkowy moment zginający od siły poziomej, powstającej przy zsuwaniu się dźwigara. W przypadku trzecim należałoby przeprowadzić analizę współpracy dwóch części hali i ocenić możliwość przeniesienia siły poziomej przez większą liczbę elementów. Przy projektowaniu połączenia na zniszczenie w warunkach pożarowych nie należy używać charakterystycznej granicy plastyczności, ale granicy wytrzymałości na rozciąganie – istotą jest określenie maksymalnej siły, jaką może wywołać zniszczony dźwigar.

W przypadku konstrukcji żelbetowych warto opracować wytyczne na bazie doświadczeń z rzeczywistymi pożarami oddziałującymi na konstrukcje, które pozwoliłyby na zwiększenie zakresu stosowania najprostszych metod.

5. Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono problemy związane z odpornością ogniową słupów stalowych i żelbetowych nagrzewanych z mniej niż czterech stron (w tym także słupów wbudowanych w ściany oddzielenia przeciwpożarowego). Niesymetryczne nagrzewanie wiąże się ze zróżnicowanymi temperaturami po obu stronach słupa, które prowadzą do powstawania przemieszczeń poziomych, które wywołują dodatkowe siły wewnętrzne zarówno w samym słupie (moment zginający), jak i w przylegającej konstrukcji. W artykule przybliżono potencjalne metody obliczeń słupów stalowych i żelbetowych z norm i literatury, wraz z uwzględnieniem ich istotnych ograniczeń.

Zgodnie z normami i [22] w projektowaniu wyróżnia się dwa główne nurty:

1. Reguły nakazowe (*prescriptive approach*) – spełnienie wymagań opisowych, niewymagających obliczeń konstrukcji: odległość od granicy działki, zachowanie odpowiedniego otulenia prętów zbrojeniowych, etc.
2. Ocena na podstawie właściwości użytkowych (*performance -based approach*). Z uwagi na ich skomplikowanie, w przypadku narzucenia powszechnego obowiązku korzystania z nich, należy liczyć się z brakiem ich respektowania – ma to miejsce obecnie w przypadku stosowania tabelarycznych metod A i B, gdzie ograniczenia zawarte w tabeli 2 są nader często pomijane. Wynika to głównie z niewystarczająco klarownego opisu metod uproszczonych i zaawansowanych.

Byłoby wskazane opracowanie metod uwzględniania nierównomiernego nagrzewania w sposób uproszczony, na bazie faktycznych pożarów, m.in. hal jednokondygnacyjnych. Innym rozwiązaniem byłoby opracowanie wzorem Niemiec, metod pozwalających na obliczenie nośności słupów przy większym zakresie stosowania, niż przewidziany w PN-EN 1992-1-2.

Literatura

[1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. (Dz. U. 2002 Nr 75, poz. 690, z późn. zm.).

[2] PN-EN 1993-1-2: 2007 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-2: Reguły ogólne – Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe.

[3] PN-EN 1994-1-2:2008 Eurokod 4. Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych. Część 1-2: Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.

[4] Correia, A.J.P.M., *Fire resistance of steel and composite steel-concrete columns*, PhD thesis, Coimbra 2011.

[5] Correia A.J.P.M., Rodrigues J.P.C., Vila Real P., *Thermal bowing on steel columns embedded on walls under fire conditions*, "Fire Safety Journal" 2014, 67, 53-69.

[6] Garlock M.E.M., Quiel S.E., *Mechanics of Wide-flanged Steel Sections that Develop Thermal Gradients Due to Fire Exposure*, "Steel Structures" 2007, 7, 153-162.

[7] Lange D., Sjostrom J., *Mechanical response of a partially restrained column exposed to localised fires*, "Fire Safety Journal" 2014, 67, 82-95.

[8] Biskupska N., Szymkuć W., *Towards the simplified modelling of thermal and mechanical response of steel tubular columns exposed to localized fire*, 12th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques", 2016. Artykuł przyjęty do publikacji w "Procedia Engineering".

[9] Obiala R., Vassart O., Zhao B.,. Sakji M.S, de la Quintana J., Morente F., Franssen J.-M., Lansival J.-B., Fire safety of industrial halls – A valorisation project, Research Fund for Coal and Steel, Final report RFS2-CT-2007-00032, 2010.

[10] PN-EN 1992-1-2:2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-2: Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.

[11] Kosiorek M., *Parametry materiałowe i obciążenia przy określaniu odporności ogniowej*, „Prace Instytutu Techniki Budowlanej" 1988, 4 (68), 5-13.

[12] PN-EN 1990:2004 Eurokod: Podstawy projektowania konstrukcji.

[13] Probabilistic Model Code, 12th draft, Joint Committee on Structural Safety, 2001.

[14] Franssen J-M., *Design of concrete columns based on EC2 tabulated data - a critical review*, First International Workshop Structures in Fire, Copenhagen, 2000.

[15] DIN EN 1992-1-2/NA:2010-12 Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall.

[16] Haksaver A., Anderberg Y., *Comparison between measured and computed structural response of some reinforced concrete columns in fire*, "Fire Safety Journal" 1981, 4(82), 293-297.

[17] Tao K.H., Yao Y., *Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns Subjected to 1-, 2-, and 3-Face Heating*, "Journal of Structural Engineering" 2004, 130, 1820-1828.

[18] Kodur V., Raut N., *A simplified approach for predicting fire resistance of reinforced concrete columns under biaxial bending, Engineering Structures*, 2012, 41, 428–443.

[19] Crozier D.A., Sanjayan J.G., *Tests of load-bearing slender reinforced concrete walls in fire*, "ACI Structural Journal" 2000, 97, 243-251.

[20] Achenbach M., Gernay T., Morgenthal G., *Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns Subjected to Standard Fire – Comparison of an Advanced and a Simplified Method*, "Proceedings of the 9th International Conference on Structures in Fire (SiF 16)", 2016, Princeton University, NJ, USA

[21] NFPA 221: Standard for Fire Walls and Fire Barrier Walls. 2000 Edition, National Fire Protection Association.

[22] Kosiorek M., *Współczesne rozwiązania budynków a bezpieczeństwo pożarowe, Problemy naukowo-badawcze budownictwa* 49 Konf. Nauk. Komit. Inż. Ląd. i Wod. PAN i Komit. Nauki PZITB „Krynica 2003", Warszawa-Krynica, 14-19 września 2003, Tom I: Budynki użyteczności publicznej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003, s. 75-91

BiTP Vol. 43 Issue 3, 2016, pp. 95–104
DOI:10.12845/bitp.43.3.2016.9

* * *

mgr inż. Wojciech Szymkuć – asystent w Instytucie Konstrukcji Budowlanych Politechniki Poznańskiej. Studia magisterskie ukończył w 2013 roku, broniąc pracę magisterską przygotowaną podczas rocznego pobytu na Leibniz Universitaet Hannover. Odbywał staże w Zakładzie Badań Ogniowych Instytutu Techniki Budowlanej i na Michigan State University. Otwarty przewód doktorski: „Analysis of behaviour and residual capacity of fire-exposed concrete-filled tubular columns" (Analiza zachowania i nośność resztkowa zespolonych słupów z rur wypełnionych betonem poddanych działaniu ognia). Autor trzech poprawek do normy PN-EN 1992-1-2.

dr hab. inż. Adam Glema – profesor nadzwyczajny Politechniki Poznańskiej w Instytucie Konstrukcji Budowlanych. Absolwent Wydziału Budownictwa Lądowego Politechniki Poznańskiej w 1985 roku. Praca doktorska na temat wzmacniania i optymalizacji elementów prętowych w stanie utraty stateczności w 1992 roku. Rozprawa habilitacyjna na temat natury falowej zjawiska lokalizacji odkształceń plastycznych w warunkach oddziaływań impulsowych w 2004 roku. Obecny obszar edukacyjno-naukowy to inżynieria bezpieczeństwa obiektów budowlanych, w tym głównie odporności pożarowej oraz budownictwo cyfrowe (BIM).

mgr inż. Michał Malendowski – asystent w Instytucie Konstrukcji Budowlanych Politechniki Poznańskiej. Studia magisterskie ukończył z wyróżnieniem w 2011 roku broniąc pracę magisterską pisaną przy współpracy z firmami Ruukki oraz Techrom. Odbywał zagraniczne staże w jednostkach naukowo badawczych: Tampere University of Technology, Technical Research Centre of Finland, University of Sheffield oraz w dziale badań i rozwoju nowojorskiej firmy Weidlinger Associates INC. Kończy przygotowywanie pracy doktorskiej o tytule: „Performance-based fire engineering for structural design".