

Mariusz MAŚLAK<sup>1</sup>  
Małgorzata SNELA<sup>2</sup>

## REDYSTRYBUCJA SIŁY PODŁUŻNEJ W STALOWYM RYGLU O NARASTAJĄCEJ W POŻARZE ZDOLNOŚCI DO WYDŁUŻENIA

W pracy dokonano oceny wpływu, jaki na zachowanie się w pożarze rozwiniętym stalowego rygla ramowego ustroju nośnego ma narastająca ze wzrostem temperatury podatność więzów. Celem analizy jest opis redystrybucji termicznie indukowanej siły podłużnej, zatem do badania wybrano rygiel przegubowo połączony ze słupami. W ten sposób węzły zachowują pełną swobodę obrotu przez cały czas pożaru i nie następuje przekazywanie na belkę momentów zginających słupy. W początkowej fazie pożaru w ryglu generowana jest siła ściskająca, rozpychająca węzły. Jeżeli nie ma nałożonego niezależnego ograniczenia na ugięcia, to ich gwałtowny przyrost wraz z rozwojem pożaru powoduje przeciwny efekt ściągnięcia podpór. W wyniku takiej interakcji oddziaływań, przy zredukowanej sztywności giętnej, rygiel pracuje jak poprzecznie obciążone wiotkie ciągnio, a zatem miarodajnym w ocenie bezpieczeństwa staje się warunek nośności na rozciąganie. Malejąca w pożarze sztywność słupów ograniczających rygiel zwiększa jego zdolność do efektywnego wydłużenia, przez co generowana termicznie siła osiowa jest wyraźnie mniejsza. Jest to równoznaczne z odpowiednio większą odpornością ogniową. Prezentowany przykład pokazuje, że zaniedbywanie w tradycyjnych obliczeniach statycznych, odniesionych do wyjątkowej sytuacji pożaru, faktu zmieniającej się wraz ze wzrostem temperatury elementów podatności więzów prowadzi do niemiarodajnych oszacowań realnego poziomu bezpieczeństwa konstrukcji i jej użytkowników. Obserwowany efekt ciągnia będzie jednak możliwy do realizacji jedynie w konstrukcji z odpowiednio skonstruowanymi węzłami, zwłaszcza tymi, które łączą rygle ze słupami. Muszą one bezpiecznie przenosić obciążenia przy relatywnie dużych deformacjach, a przez to zapewniać wystarczającą zdolność do odkształceń całej ramy.

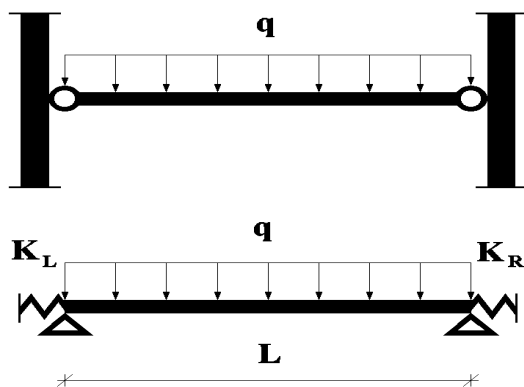
**Słowa kluczowe:** rygiel, słup, rama, pożar, temperatura, siła osiowa, odporność ogniowa, podatność.

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Mariusz Maślak, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. 126415673, [mmaslak@pk.edu.pl](mailto:mmaslak@pk.edu.pl)

<sup>2</sup> Małgorzata Snela, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, tel. 815384388, [ma.snela@gmail.com](mailto:ma.snela@gmail.com)

## 1. Wprowadzenie

Wiarygodne oszacowanie odporności ogniowej stalowych ramowych ustrojów nośnych wymaga uwzględnienia potencjalnej interakcji oddziaływań sąsiadujących ze sobą elementów konstrukcyjnych, pod kątem oceny stopnia ograniczenia ich zdolności do realizacji generowanych termicznie odkształceń. Na skutek tego typu podatnych więzów, o charakterystyce zmieniającej się wraz z rozwojem pożaru, w elementach tych indukują się dodatkowe siły wewnętrzne, które bardzo szybko mogą doprowadzić do wyczerpania możliwości przenoszenia obciążeń zewnętrznych przyłożonych do rozpatrywanego ustroju. Nośność takich konstrukcji maleje zresztą wraz ze wzrostem temperatury składających się na nie elementów, na ogół proporcjonalnie do redukcji granicy plastyczności stali, z której zostały wykonane. Temperatura stali wpływa również w sposób zasadniczy na specyfikację miarodajnych współczynników niestateczności. Z tego względu należy odchodzić od uświęconej tradycją metodyki analizy, poddającej ocenie zachowanie się w pożarze pojedynczych elementów konstrukcyjnych, myślowo wyizolowanych z całego ustroju nośnego, wraz z przypisanymi do nich i modelowanymi w sposób uproszczony warunkami brzegowymi. W miarę możliwości takie podejście warto zastąpić badaniem odpowiedzi na ekspozycję ogniową większych podukładów lub nawet całych konstrukcji. Celem niniejszej pracy jest szczegółowy opis zachowania się w pożarze rygla ramy o ograniczonej zdolności do potencjalnego, generowanego termicznie wydłużenia.

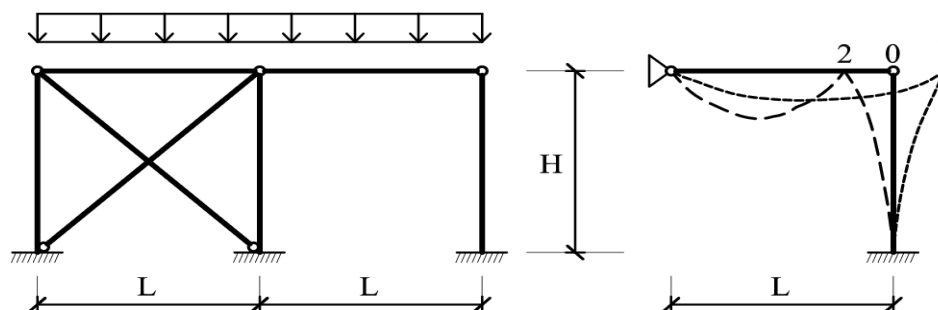


Rys. 1. Rygiel analizowany w pracy.

Fig. 1. The beam considered in the article.

W celu wyeksponowania roli i przebiegu redystrybucji siły podłużnej w ryglu przyjęto, że jest on przegubowo połączony z ograniczającymi go

słupami (Rys. 1). Węzły nominalnie przegubowe zachowują pełną swobodę obrotu przez cały czas pożaru. W ten sposób nie zachodzi, skądinąd niezmiernie interesujące przy analizie zachowania się ramy w pożarze, przekazywanie momentów zginających ze słupów na belkę. Charakteryzuje je jednak skończona podatność na przesuw poziomy, której miarą są odwrotności współczynników sztywności  $K_L$  i  $K_R$ , specyfikowanych odpowiednio dla lewej i prawej podpory. Analizowany rygiel, obciążony równomiernie rozłożonym obciążeniem  $q$ , w podstawowej sytuacji projektowej pracuje jako element zginany (interakcja ze ścinaniem jest zanedbywalna). W warunkach pożaru charakter jego pracy zmienia się diametralnie, jego nośność jest bowiem determinowana przez interakcję momentu zginającego i siły podłużnej. Wartość termicznie indukowanej siły podłużnej zależy od podatności więzów. Wartość ta nie narasta jednak monotonicznie. Początkowo wydłużający się wskutek nagrzania rygiel rozpycha ograniczające go słupy generując podłużną siłę ściskającą (*push-out effect*). Równocześnie jednak ze wzrostem temperatury maleje w sposób ciągły sztywność giętna rygla, co przekłada się na coraz szybszy przyrost jego ugięcia. Narastanie ugięć wiąże się ze ściąganiem podpór „do wewnątrz” ramy, a zarazem z generowaniem w ryglu osiowej siły rozciągającej (*pull-in effect*). Przy odpowiednio dużych ugięciach siła rozciągająca zaczyna przeważać nad siłą ściskającą i następuje postępujące redukowanie wartości wypadkowej siły osiowej (*pullback effect*). W jego efekcie wypadkowa siła osiowa najpierw całkowicie zanika, a następnie „na placu boju” pozostaje jedynie rozciąganie. Zwróćmy uwagę, że sztywność giętna jest już wtedy na tyle mała, że nie daje możliwości przeniesienia momentów zginających. Tak więc rozgrzany rygiel pracuje jak poprzecznie obciążone wiotkie ciężno (*catenary effect*) [1]. Jeśli założyć, że rygiel przez cały czas pożaru był zabezpieczony przed zwichrzeniem, co przy malejącej wartości modułu sprężystości podłużnej jest adekwatne raczej przy niezbyt wysokiej temperaturze elementu, to o jego nośności w początkowej fazie ekspozycji ogniowej decyduje interakcyjny warunek zginania ze ściskaniem. Jeśli jednak nie ulegnie on w takich warunkach całkowitej destrukcji i nie ma nałożonego niezależnego ograniczenia na jego ugięcia lub innego typu deformacje, a także na tempo ich przyrostu, to warunkiem miarodajnym do oceny nośności staje się ograniczenie wynikające z granicznej nośności rygla na rozciąganie (warunek ciężna). Opisane powyżej etapy pracy rygla w pożarze przekładają się na zachowanie całej ramy. Ilustruje to Rys. 2 dla przypadku ramy stężonej, gdzie naroże 0 początkowo dąży do zajęcia pozycji 1, odpowiednio oddziałując na sąsiadujący słup, w końcu jednak lokuje się w pozycji 2, ściągając wskazany słup do wewnątrz budowli. Takie zachowanie słupów ram było zresztą obserwowane w realnych pożarach. Wystarczy przejrzeć typową inwentaryzację deformacji elementów konstrukcyjnych zanotowanych na klasycznym pogorzeliisku.



Rys. 2 Etapy deformacji rygla i słupa ramy stężonej w pożarze rozwiniętym (opis w tekście), z lewej – schemat ramy, z prawej - praca myślowo wyizolowanego podukładu (według [2]).

Fig. 2 Stages of deformations of beam and column in braced frame under fully developed fire conditions (detailed explanation in the text), on the left – the frame scheme, on the right – behaviour of imaginary isolated subframe (according to [2]).

## 2. Szacowanie wartości siły osiowej w ryglu

W ocenie odporności ogniowej rozpatrywanego rygla ramy pierwszorzędne znaczenie ma precyzyjne oszacowanie wartości generowanej w nim siły osiowej  $N_{c,\theta}$ . Zagadnieniu temu poświęcone zostały prace [3, 4 i 5]. Podano w nich różne sposoby wyliczania poszukiwanej siły w kontekście analizy jej zależności od założonej podatności węzłów na przesuw poziomy. Zakładano jednak stałą wartość wskazanej podatności, co sugerowało że ekspozycji ogniowej poddany został jedynie analizowany rygiel, ograniczające go słupy natomiast znajdowały się poza zasięgiem pożaru. Jest oczywistym, że równoczesne ogrzanie słupów, stanowiących ograniczenie dla swobodnej realizacji termicznie indukowanego wydłużenia rygla, znacząco obniży ich sztywność giętną. Zwiększy to zdolność rygla do efektywnego wydłużenia, a zatem generowana w nim siła osiowa będzie wyraźnie mniejsza. Uwzględnienie tego efektu, przy szacowaniu odporności ogniowej belki, da w efekcie jej wartość zdecydowanie większą, czyli także odpowiednio dłuższy czas, przez który, w przypadku wystąpienia pożaru rozwiniętego, będzie ona zapewniała bezpieczne przenoszenie przyłożonych do niej obciążeń zewnętrznych. Do szczegółowej analizy wybrano dwa podejścia pozwalające na wyznaczenie wartości siły osiowej w rozpatrywanym ryglu przy założonej podatności podpór.

### 2.1 Podejście uproszczone

Klasykne podejście do wyznaczenia wartości siły  $N_{c,\theta}$  przy zadanej temperaturze  $\Theta_a$  wykorzystuje równanie równowagi:

$$\delta_{\theta} + \delta_m + \delta = 0 \quad (1)$$

Całkowite odkształcenie rygla  $\delta$  jest w tym ujęciu sumą swobodnego odkształcenia termicznego  $\delta_{\theta}$ , to jest wydłużenia ogrzanego pręta w przypadku gdyby mógł się rozszerzać bez przeszkód, i odkształcenia mechanicznego  $\delta_m$ , które jest miarą oddziaływania podpór krępującego to wydłużenie, przy czym:

$$\delta_{\theta} = \alpha_{\theta}(\Theta_a - 20)L \quad \text{oraz} \quad \delta_m = \frac{N_{c,\theta}L}{E_{a,\theta}A} \quad (2)$$

W powyższych zależnościach  $L[m]$  jest rozpiętością rygla, natomiast  $A[m^2]$  powierzchnią jego przekroju poprzecznego. Ponadto przez  $E_{a,\theta} = k_{E,\theta}E_a$  oznaczono zredukowany w temperaturze pożarowej moduł sprężystości podłużnej stali, z której został on wykonany, zaś przez  $\alpha_{\theta} [ (^{\circ}C)^{-1} ]$  współczynnik rozszerzalności termicznej tej stali. W dokładniejszych rozważaniach warto uwzględnić fakt zmiany wartości tego współczynnika ze wzrostem temperatury stali. Przyjęto także wartość  $20^{\circ}C$  jako założoną temperaturę montażu. Z drugiej strony analizowane odkształcenie zależy od podatności  $1/K$  podpór na przesuw poziomy, gdzie  $1/K = (1/K_L + 1/K_R)$ , a zatem:

$$\delta = \frac{N_{c,\theta}}{K} \quad (3)$$

Ostatecznie otrzymuje się:

$$N_{c,\theta} = - \frac{\alpha_{\theta}(\Theta_a - 20)E_{a,\theta}A}{1 + \frac{E_{a,\theta}A}{KL}} \quad (4)$$

Zaprezentowana metodyka obliczeń daje wprawdzie bezpieczne, ale mało precyzyjne oszacowania siły podłużnej. Uzyskane wyniki są wyraźnie zawyżone w przypadku wysokiej temperatury elementu. Nie uwzględnia się bowiem faktu narastania ze wzrostem temperatury  $\Theta_a$  ugięć belki, co jest wynikiem postępującej redukcji jej sztywności giętej.

## 2.2 Oszacowanie uwzględniające deformacje belki w pożarze

Podejście analizowane w niniejszym artykule stanowi rozwinięcie propozycji podanych przez *Y. Z. Yina* i *Y. C. Wanga* [1]. Rozważmy najpierw przypadek zerowej podatności podpór ( $1/K = 0$ ). Niech w każdej chwili pożaru  $t_{fi}$  znana jest funkcja  $z = z(x)$  opisująca kształt odkształconej osi rygła. Wydłużenie elementu, które wynika z jego ugięcia, wyraża wtedy formuła:

$$\Delta L = \int_0^L \sqrt{1 + \left(\frac{dz(x)}{dx}\right)^2} dx - L \quad (5)$$

Składa się na nie wydłużenie termiczne  $\delta_\Theta$  i odkształcenie mechaniczne  $\delta_m$ , które jest miarą oddziaływania podpór, przy czym:

$$\delta_\Theta = \Delta L_\Theta = \alpha_\Theta (\Theta_a - 20)L \quad \text{i} \quad \delta_m = \Delta L_m = \delta - \delta_\Theta = \Delta L - \Delta L_\Theta \quad (6)$$

Ponadto, przy akceptacji uproszczonego wyrażenia na krzywiznę, zachodzi:

$$N_{c,\Theta} = E_{a,\Theta} A \frac{\delta_m}{L} \quad \text{i} \quad M_{LR,\Theta} = M(x) \Big|_{x=L/2} = -E_{a,\Theta} I_y \frac{d^2 z(x)}{dx^2} \Big|_{x=L/2} \quad (7)$$

Precyzyjne określenie funkcji  $z = z(x)$  jest pracochłonne i w zasadzie wymaga obliczeń komputerowych, gdyż ugięcia muszą być analizowane również w zakresie pozasprężystym. Znacznie łatwiejsze jest znalezienie wartości maksymalnej  $z_{\max} = \max z(x)$ . Wystarczy wykorzystać zwykły warunek równowagi, który w przypadku analizowanego rygła ma postać:

$$M_{LR,\Theta} = M_0 - N_{\Theta} z_{\max} \quad \text{przy czym} \quad M_0 = qL^2/8 \quad (8)$$

W dalszych rozważaniach akceptuje się przybliżenie, że postać funkcji  $z = z(x)$  nie zmienia się gdy naprężenia przechodzą w zakres sprężysto – plastyczny. Odpowiednie rozwiązania dla zakresu sprężystego są ogólnie znane. W przypadku gdy obie podpory są przegubowe i obciążenie  $q$  jest równomiernie rozłożone na całej długości belki zachodzi:

$$z(x) = \frac{16z_{\max}}{5L} \left( \frac{x^4}{L^3} - \frac{2x^3}{L^2} + x \right) \quad \text{a stąd} \quad \frac{d^2 z(x)}{dx^2} \Big|_{x=L/2} = -\frac{9,6z_{\max}}{L^2} \quad (9)$$

Ponadto, po scałkowaniu (5):

$$\delta = \Delta L = \frac{2176z_{\max}^2}{875L} \quad (10)$$

co na bazie (7) i (8) daje układ równań:

$$N_{\Theta} = k_{E,\Theta} E_a A \left[ \frac{2176z_{\max}^2}{875L^2} - \alpha_{\Theta} (\Theta_a - 20) \right] \quad (11)$$

$$k_{E,\Theta} E_a I_y \frac{9,6z_{\max}}{L^2} = \frac{qL^2}{8} - k_{E,\Theta} E_a A \left[ \frac{2176z_{\max}^2}{875L^2} - \alpha_{\Theta} (\Theta_a - 20) \right] z_{\max} \rightarrow z_{\max} \quad (12)$$

Podatność na przesuw, z uwzględnieniem podatności samego rygła, wyraża parametr [5]:

$$\frac{1}{K^*} = \frac{L}{k_{E,\Theta} E_a A} + \frac{1}{K} \quad (13)$$

Ostatecznie otrzymuje się układ równań:

$$N_{\Theta} = K^* L \left[ \frac{2176z_{\max}^2}{875L^2} - \alpha_{\Theta} (\Theta_a - 20) \right] \quad (14)$$

$$k_{E,\Theta} E_a I_y \frac{9,6z_{\max}}{L^2} = \frac{qL^2}{8} - K^* L \left[ \frac{2176z_{\max}^2}{875L^2} - \alpha_{\Theta} (\Theta_a - 20) \right] z_{\max} \rightarrow z_{\max} \quad (15)$$

Równanie (15) można rozwiązywać w sposób bezpośredni (bez formalnego rozwikłania względem  $z_{\max}$ ) z wykorzystaniem komputera, na przykład w środowisku programu *Mathcad*.

### 3. Przykład numeryczny

#### 3.1. Parametry rozpatrywanej ramy

W przykładzie rozpatrywanym w niniejszej pracy przyjęto, że rozpiętość rygła wynosi  $L = 6\text{ m}$ . Zakłada się ponadto, że rygiel jest zabezpieczony przed zwichrzeniem (także przez cały czas trwania pożaru), ma stały przekrój IPE 360 i został wykonany ze stali S235. Zatem nośność rygła określona dla podstawowej sytuacji projektowej (bez wpływu pożaru) wynosi:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1019,15 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 239,5 \text{ kNm} \quad (16)$$

Nośność ta pozostanie taka sama, jeśli określać ją przy założeniu wyjątkowej sytuacji pożaru i równomiernym ogrzaniu rygła (zarówno na jego długości jak i w każdym przekroju poprzecznym), ale tylko w chwili jego zainicjowania, czyli dla  $t_{fi} = 0$  (zachodzi bowiem równość częściowych współczynników bezpieczeństwa  $\gamma_{M,fi} = \gamma_{M0} = 1,0$ ). Wraz ze wzrostem temperatury rygła jego nośność będzie bowiem ulegać postępującej redukcji, proporcjonalnej do stopnia zmniejszenia się granicy plastyczności stali, z której został wykonany, tak że:

$$M_{c,Rd,\Theta} = k_{y,\Theta} M_{c,Rd} \quad (17)$$

przy czym wartości współczynnika redukcyjnego  $k_{y,\Theta}$ , odpowiadające założonej temperaturze elementu, zestawiono w normie [6].

W celach porównawczych przeanalizowano dwa rodzaje słupów ograniczających badany rygiel. W myślowo wyizolowanym podzespole ramy zawierającym pojedynczą kondygnację, z nieprzesuwnymi przegubowymi podporami (zakłada się, że rama jest stężona), w obu przypadkach mają one taką samą wysokość  $H = 4 \text{ m}$  (to znaczy po  $2 \text{ m}$  powyżej i poniżej rygła) i wykonano je z tej samej stali S235. W pierwszym przypadku zakłada się, że są one bardziej podatne, do ich wykonania wykorzystano bowiem dwuteownik HEB 260, w drugim natomiast ich sztywność jest znacząco większa gdyż zastosowano dwuteownik HEB 300.

Badany rygiel obciążony jest obciążeniem stałym o wartości charakterystycznej  $g_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$  oraz pojedynczym obciążeniem zmiennym, dla którego  $q_k = 3,0 \text{ kN/m}^2$  (kategoria B). Obydwa obciążenia są równomiernie rozłożone, co daje odpowiednio  $G_k = 2,5 \cdot 6,0 = 15 \text{ kN/m}$  oraz  $Q_k = 3,0 \cdot 6,0 = 18 \text{ kN/m}$ . Zauważmy, że w podstawowej sytuacji projektowej rygiel zapewnia bezpieczne przenoszenie obciążeń, gdyż:

$$M_{\max} = \frac{(\gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k) L^2}{8} = \frac{(1,35 \cdot 15 + 1,5 \cdot 18) \cdot 6^2}{8} = 212,6 \text{ kNm} < M_{c,Rd} \quad (18)$$

Do wyznaczenia miarodajnej wartości efektu obciążenia specyfikowanej dla wyjątkowej sytuacji pożaru stosuje się odmienne zasady kombinacji oddziaływań cząstkowych, typowe w sytuacjach zdarzeń wyjątkowych. Zachodzi wtedy:

$$M_{\max} = M_{\max} = \frac{(G_k + \psi_1 Q_k)L^2}{8} = \frac{(15 + 0,5 \cdot 18) \cdot 6^2}{8} = 108,0 \text{ kNm} \quad (19)$$

dając przy tym już w chwili zaistnienia pożaru dodatkowy zapas bezpieczeństwa. Zapas ten na skutek równoczesnej redukcji nośności ulega jednak w pożarze szybkiemu wyczerpaniu. Należy podkreślić, że chociaż wraz rozwojem pożaru tak oszacowana wartość momentu zginającego nie będzie się zmieniać (zaniedbuje się efekt zmniejszania się realnego obciążenia, zarówno stałego jak i zmiennego, wskutek wypalania się zgromadzonych w strefie pożarowej materiałów palnych oraz prawdopodobnej ewakuacji użytkowników budynku), to jednak coraz większego znaczenia w globalnym bilansie oddziaływań zacznie nabierać termicznie generowana siła osiowa, w ostatecznym efekcie właściwie decydująca o efektywnej odporności ogniowej badanego rygla.

### 3.2 Sztywność giętna słupów ograniczających rygiel i jej zmiany w warunkach pożaru

Wartość siły osiowej w ryglu jest uzależniona od stopnia skrupowania jego podpór, ograniczającego możliwość swobodnego wydłużania się badanego elementu. Zgodnie z zasadami statyki, przy zezwoleniu na możliwy w pożarze przesuw pionowy górnych podpór modelowanych słupów, zachodzi (Rys. 1):

$$K_{L,\Theta} = K_{R,\Theta} = \frac{48k_{E,\Theta}E_aJ}{h^3} = k_{E,\Theta}K_L = k_{E,\Theta}K_R \quad (20)$$

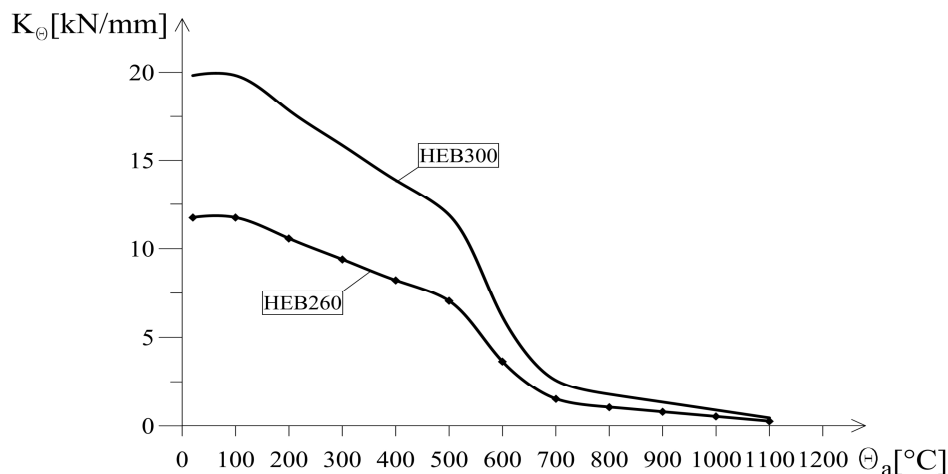
przy czym wartości współczynnika  $k_{E,\Theta}$ , redukującego moduł sprężystości podłużnej zastosowanej stali w temperaturze pożarowej, zestawiono w przepisach [6]. Zależność (20) daje natychmiast:

$$\frac{1}{K_{\Theta}} = \frac{1}{K_{L,\Theta}} + \frac{1}{K_{R,\Theta}} = \frac{h^3}{24k_{E,\Theta}E_aJ} = \frac{1}{k_{E,\Theta}K} \quad (21)$$

Relację tę, odniesioną do miarodajnej sztywności  $K_{\Theta}$ , dla przyjętych w przykładzie danych, ilustruje Rys. 3.

W efekcie, po uogólnieniu relacji (13), mamy:

$$\frac{1}{K_{\Theta}^*} = \frac{L}{k_{E,\Theta}E_aA} + \frac{1}{K_{\Theta}} = \frac{1}{k_{E,\Theta}} \left( \frac{L}{E_aA} + \frac{h^3}{24E_aJ} \right) \quad (22)$$



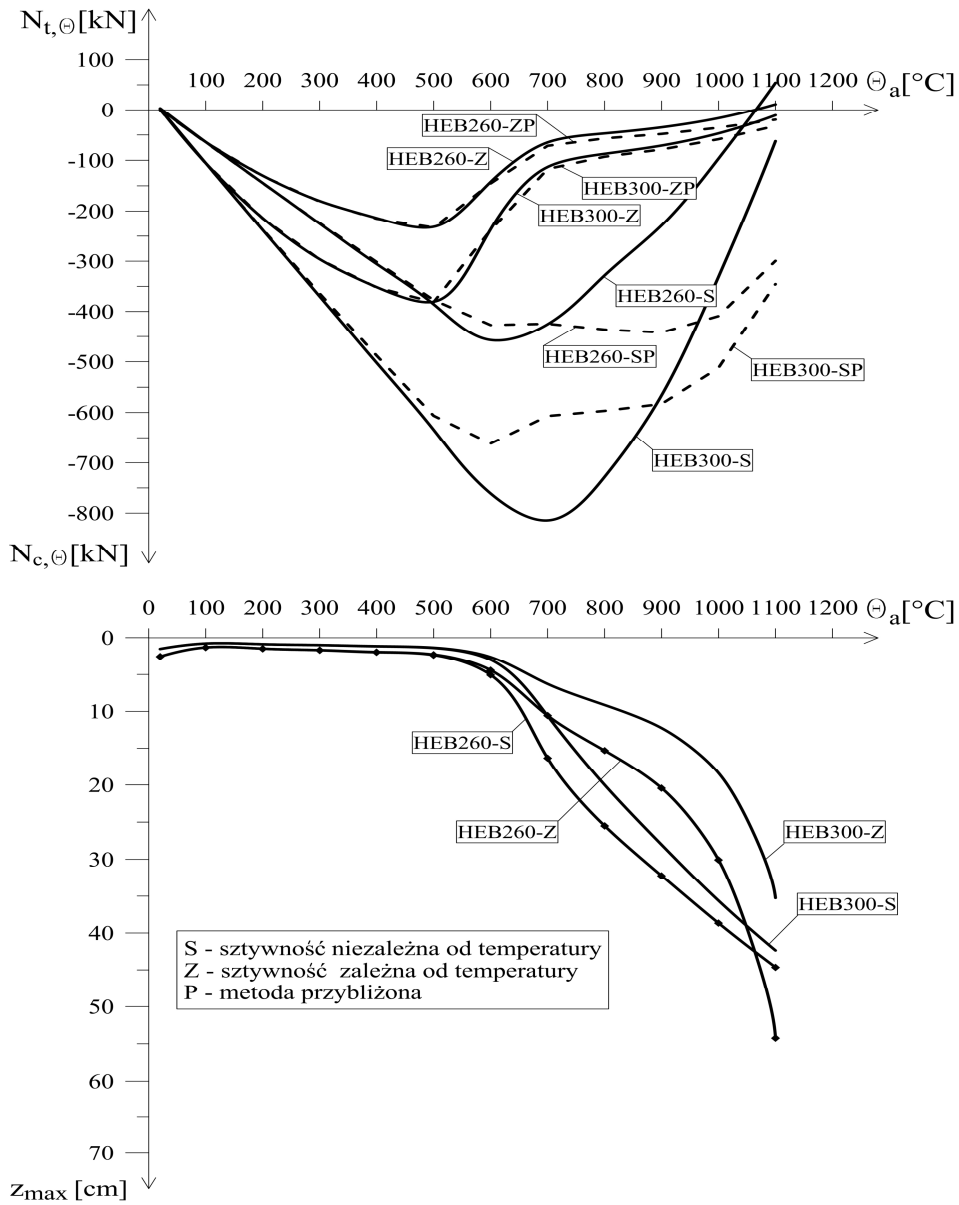
Rys. 3. Redukcja miarodajnej sztywności  $K_{\Theta}$  w temperaturze pożarowej.

Fig. 3. Reduction of conclusive stiffness  $K_{\Theta}$  under fire temperature.

### 3.3 Oszacowanie termicznie generowanej siły podłużnej

Monitorowanie narastającej wraz z rozwojem pożaru zdolności ryglia do efektywnego wydłużenia pozwala na wyznaczenie wartości termicznie generowanej siły osiowej decydującej o odporności ogniowej badanego elementu. Można tego dokonać w sposób uproszczony, przy wykorzystaniu zależności (4), lub nieco bardziej dokładnie, przez zastosowanie relacji (14). Wyniki uzyskane w rozpatrywanym przykładzie zaprezentowano na Rys. 4.

Łatwo zauważyć, że gwałtownemu przyspieszeniu tempa narastania ugięcia ryglia, odpowiadającemu sprężysto – plastycznemu zakresowi pracy rozpatrywanego elementu, towarzyszy jakościowa zmiana charakteru generowanej siły osiowej. Siła ściskająca początkowo spowalnia swój przyrost a następnie zaczyna maleć, by w końcu ustąpić pola sile rozciągającej. Klasyczne rozciąganie ma jednak miejsce przy tak wysokiej temperaturze elementu, że w zasadzie trudno mówić o jakiegokolwiek nośności. Niemniej jednak sposób redystrybucji siły podłużnej determinuje charakter deformacji całkowicie zdegradowanych układów ramowych.



Rys. 4. Wpływ temperatury ryglu rozpatrywanego w przykładzie: na generowaną w ryglu siłę osiową (rysunek górny), na ugięcie ryglu (rysunek dolny).

Fig. 4. Influence of the temperature of beam, considered in the example: on the value of the axial force generated in such beam (above), on the beam deflection (below).

#### 4. Uwagi końcowe

Celem autorów niniejszej pracy było sprawdzenie wpływu, jaki na oszacowanie siły osiowej generowanej w ryglu eksponowanym ogniowo ma uwzględnienie w analizie zmieniającej się wraz z rozwojem pożaru podatności więzów ograniczających jego zdolność do potencjalnego wydłużenia. Analiza wyników pokazanych na Rys. 4 pozwala wnioskować, że brak tego typu rozważań i poprzestanie na założeniu stałej podatności, ustalonej dla warunków podstawowej sytuacji projektowej, prowadzi do całkowicie niewiarygodnych oszacowań odporności ogniowej ramowej konstrukcji nośnej. Przypomnijmy, że w tradycyjnym podejściu obliczeniowym, bazującym na myślowym wyizolowaniu z ustroju pojedynczych elementów konstrukcyjnych, kwestia podatności nie jest jak dotąd w ogóle zauważana. Przyjmując, że odporność ogniową badanego rygla wyznaczy się na podstawie interakcyjnego warunku granicznego łączącego zginanie ze ściskaniem (warunek wyspecyfikowany dla rozciągania będzie miarodajny dopiero w bardzo wysokiej temperaturze stali, gdy deformacje ramy powinny być na tyle duże, że znacznie wcześniej wykluczą potencjalną możliwość jej użytkowania) można stwierdzić, że wartość siły osiowej ma decydujące znaczenie dla zachowania się w pożarze całego ustroju nośnego (jej wpływ na odporność ogniową sąsiednich słupów jest również zasadniczy). Jeśli pominąć w obliczeniach postępującą redukcję sztywności, to siła osiowa oszacowana w ten sposób (oznaczenie „S” na Rys. 4), przy słupach wykonanych z kształtownika HEB 300, osiąga wartości dochodzące nawet do  $800\text{ kN}$ . Tymczasem uwzględnienie tego faktu (oznaczenie „Z” na Rys. 4) prowadzi do znacznie łagodniejszego oszacowania, na poziomie nie przekraczającym  $400\text{ kN}$ . Podobnie dużą różnicę obserwuje się w przypadku słupów wykonanych z kształtownika HEB 260. Metoda przybliżona (linie przerywane i oznaczenie „P” na Rys. 4) wiąże się z wykorzystaniem w obliczeniach uproszczonej formuły (4). Różnice w otrzymanych w ten sposób oszacowaniach w stosunku do wyników uzyskanych po zastosowaniu dokładniejszej zależności (14) są istotne, zwłaszcza jeśli odnosić je do relatywnie wysokiej temperatury stali, gdy deformacje badanego elementu są już na tyle duże, że zaczynają decydować o jego nośności. Zwróćmy jednak uwagę na fakt, że stają się one w zasadzie zaniedbywalne jeśli tylko zostanie uwzględniona faktyczna podatność więzów i jej zmienność w warunkach pożaru. Warto również odnotować fakt znacznie wolniejszego tempa narastania ugięć rygla przy bardziej precyzyjnym modelowaniu podatności. Jest to zrozumiałe, gdyż w takim przypadku ograniczenia potencjalnych deformacji ulegają postępującemu osłabieniu.

Opisany w niniejszych rozważaniach tak zwany efekt ciągną, związany z jakościową zmianą sposobu przenoszenia przez konstrukcję przyłożonych do niej obciążeń, daje jej dodatkową rezerwę nośności. Uaktywniona zostaje bowiem alternatywna ścieżka równowagi, stymulowana poprzez narastającą

dominację generowanej w ryglu osiowej siły rozciągającej. Należy jednak wyraźnie zaznaczyć, że rezerwa tego typu stanie się realna tylko wtedy, gdy rama posiada od samego początku, albo uzyska i zachowa w pożarze, wystarczającą zdolność do bezpiecznej realizacji znacznych odkształceń plastycznych. Powinna być zatem kształtowana w taki sposób, aby już w procesie projektowania, przy zagwarantowaniu odpowiedniej nośności, zapewnić równocześnie niezbędną odkształcalność węzłów. Pozwoli to na zminimalizowanie zagrożenia wystąpienia zniszczenia ustroju nośnego zachodzącego w sposób nagły. Z dużym prawdopodobieństwem w takim przypadku nie wytworzy się również łańcuch kinematyczny związany z katastrofą typu postępującego.

### Literatura

- [1] Yin Y.Z., Wang Y.C.: Analysis of catenary action in steel beams using a simplified hand calculation method. Part 1: Theory and validation for uniform temperature distribution. *Journal of Constructional Steel Research*, 61, 2005.
- [2] Dondera A., Giuliani L.: Fire-induced collapse of steel structures. Basic mechanisms and countermeasures, *Proceedings of International Conference "Application of Structural fire Engineering"*, April 19-20, 2013, Prague, Czech Republic, s. 265-271,
- [3] Maślak M.: Odporność ogniowa stalowych belek stropowych z węzłami o skończonej podatności na przesuw poziomy, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, Nr 256, 2008, seria „Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, zeszyt 50, s. 201-210,
- [4] Maślak M.: On behaviour of steel beams with restrained ability of thermal elongation during fire, *Archives of Civil Engineering*, LIV, 4, 2008, s. 769-792,
- [5] Maślak M.: Siła osiowa w belce z ograniczoną możliwością termicznego wydłużenia w wyjątkowej sytuacji pożaru, *Inżynieria i Budownictwo*, 7/2009, s. 406-408,
- [6] PN-EN 1993-1-2, Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-2: Reguły ogólne – Obliczanie konstrukcji na wypadek pożaru.

### AXIAL FORCE REDISTRIBUTION IN STEEL BEAM WITH THERMAL ELONGATION CAPABILITY INCREASING IN FIRE

#### Summary

In the article the evaluation is made of the influence of beam thermal elongation capability, increasing with rising temperature of adjoining members, on behaviour of steel framed loadbearing structure under fire conditions. The internal axial force is induced in considered beam as a result of thermal strains constraintment, since the limit state condition specified typically for beam-column case becomes conclusive in structural fire resistance assessment. Such compressive force is greater for higher steel temperature; however, this conclusion is usually accurate only for the initial phase of fully developed fire. Having reached the maximum value it starts decrease because of the rapid beam deformation growth, and finally only the tensile force

is generated when the beam flexural stiffness becomes insufficient to carry any bending moment. As a result of such redistribution of internal forces the considered beam behaves like transversely loaded flaccid tie and the conclusive limit state is connected with the pure tension. The stiffness of the columns adjoining the examined beam decreases under fire conditions, so the capability of beam thermal elongation in such circumstances is monotonically increasing with the growth of the temperature of structural members. Conclusively, the thermally generated axial force is reduced, then the fire resistance of the whole frame becomes higher. Such catenary effect, discussed in the article, gives the loadbearing structure additional reserve related to its resistance. However, this reserve is possible to be available only when the analysed frame is sufficiently ductile, which means that the significant plastic deformations, induced in the loadbearing structure, can be safely carried.

**Keywords:** beam, column, frame, fire, temperature, axial force, fire resistance, flexibility.

DOI: 10.7862/rb.2013.25

*Przesłano do redakcji: w maju 2013 r.*

*Przyjęto do druku: w lipcu 2013 r.*