

Alternatywne podejścia do budowy odniesionych do warunków pożaru charakterystyk moment – obrót na przykładzie stalowego węzła rygiel – słup

Alternative approaches to construction of moment – rotation characteristics related to fire conditions on an example of steel beam-to-column joint

Mariusz Maślak¹, Małgorzata Snela²

¹Katedra Konstrukcji Metalowych,
Wydział Inżynierii Ładowej, Politechnika Krakowska
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
e-mail: mmaslak@pk.edu.pl

²Katedra Konstrukcji Budowlanych
Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin
e-mail: m.snela@pollub.pl

Streszczenie

W artykule porównano dwie alternatywne techniki obliczeniowe pozwalające na wiarygodną specyfikację miarodajnych dla warunków pożaru rozwiniętych charakterystyk moment – obrót. Charakterystyki tego typu są obiektywną miarą zmieniającej się wraz z rozwojem pożaru podatności stalowego węzła konstrukcji nośnej. Analizę przeprowadzono na przykładzie typowego węzła rygiel – słup. W pierwszym przypadku relacje skojarzone zadaną temperaturą elementów budowano w oparciu o znaną a priori charakterystykę odpowiadającą temperaturze pokojowej, w drugim natomiast poprzez uogólnienie klasycznej metody składnikowej, takie aby ewentualne wpływy termiczne zostały uwzględnione w każdym potencjalnym modelu zniszczenia składników węzła. Wykazano, że porównywane metody nie są równoważne. Pierwsza z nich nie uwzględnia bowiem redukcji w temperaturze pożarowej wytrzymałości śrub, co staje się szczególnie istotne gdy temperatura węzła osiąga wartość większą od 300°C.

Abstract

Two alternative calculation techniques are compared in the presented article. Both of them deal with the specification of moment – rotation characteristics, related to fully developed fire conditions. Characteristics of this type are accepted as the objective measure of steel structural joint flexibility, increasing with fire development. The analysis made on an example is related to typical beam-to-column joint. The first approach allows to construct the relations being suitable for the assumed joint temperature if only the adequate characteristic is known in advance, specified for room temperature conditions, whereas the second one, based on the generalization of the classical component methodology, is connected with the consideration of potential temperature influence in each conclusive failure mode being identified for particular joint members. As a conclusion it is shown that the examined techniques are not equivalent because the reduction of bolts resistance under fire conditions is neglected if the first of those is used in practice. The quantitative difference between obtained results becomes particularly significant when the joint temperature exceeds the value 300°C.

Słowa kluczowe: rama stalowa, podatność węzła, pożar rozwinięty, metoda składnikowa, charakterystyka moment – obrót.
Keywords: steel frame, joint flexibility, fully developed fire, component method, moment – rotation characteristic.

1. Wprowadzenie

Podatność węzłów stalowej konstrukcji nośnej narasta w warunkach pożaru ze wzrostem temperatury składających się na nią elementów. Oznacza to, że węzły projektowane jako nominalnie sztywne po poddaniu ich ekspozycji ogniowej stają się w efekcie węzłami podatnymi. Poza tym, stopień tej podatności zmienia się w czasie. Fakt ten, jakkolwiek intuicyjnie oczywisty, nie był dotychczas uwzględniany w praktyce inżynierskiej. Jest to tym dziwniejsze, że wpływ malejącej sztywności węzłów istotnie zmienia wynikowe oszacowanie nośności ustroju odniesione do założonej chwili pożaru. Ilościowe wyniki określające wagę pominięcia tego typu efektu w globalnej analizie bezpieczeństwa konstrukcji, prowadzonej w celach porównawczych metodami pierwszego i drugiego rzędu, można znaleźć na przykład w pracy [1].

Miarodajna ocena odporności ogniowej konstrukcji nośnej

1. Introduction

Flexibility of joints being a part of steel loadbearing structure increases under fire conditions with the growth of structural members temperature. It means that joints previously designed as nominally rigid tend to become flexible in fire situation, with degree of flexibility increasing during fire development. This fact, however seems to be intuitively obvious, is not yet considered in engineering practice. It is difficult to understand because the joint stiffness decrease significantly modify the evaluations of the structure resistance related to the particular fire points-in-time. Quantitative results helpful in consequence estimation of the neglecting such effect in global structural safety analysis, obtained for comparative purposes both for the first-order and for the second-order methods, can be found for example in [1].

The competent structure fire resistance assessment will not

nie będzie wiarygodna, nawet przy zastosowaniu odpowiednio złożonych modeli numerycznych, jeśli w rozważaniach zapomni się o zmianie charakteru pracy więzów krępujących generowane termicznie odkształcenia. Z tego względu należy rozwijać odpowiednie algorytmy postępowania pozwalające na efektywną analizę potencjalnego zachowania się ustroju nośnego w pożarze. W części dotyczącej opisu zmian sztywności węzłów z reguły opierają się one na uogólnieniu klasycznej metody składnikowej. Mogą jednak różnić się w szczegółach, co w rezultacie prowadzi do znacząco różnych wyników.

Celem niniejszej pracy jest porównanie dwóch podejść zalecanych do stosowania w praktyce. Pierwsze z nich bazuje na wykorzystaniu znanej a priori charakterystyki moment – obrót, wyznaczonej dla rozpatrywanego węzła przy założeniu podstawowej sytuacji projektowej. Poszukiwane relacje odniesione do sytuacji pożaru, przy założonych wartościach temperatury węzła, wyznaczone są przez odpowiednią korektę takiej wyjściowej charakterystyki. Algorytm tego typu postępowania został szczegółowo opisany przez autorów w pracach [2] i [3] na podstawie sugestii zawartych w [4]. Drugie podejście, alternatywne względem pierwszego, opiera się na uwzględnieniu wpływu temperatury już na etapie analizy potencjalnych mechanizmów zniszczenia, skojarzonych z poszczególnymi elementami węzła, a następnie na składaniu tych mechanizmów zgodnie z kanonem klasycznej metody składnikowej. Do dalszych rozważań wybrano typowy węzeł rygiel – słup z wystającą blachą czołową.

2. Charakterystyka moment – obrót opisująca zachowanie się węzła w podstawowej sytuacji projektowej.

Do utworzenia dedykowanej dla węzła charakterystyki moment – obrót wybrano podejście zalecane przez normę PN-EN 1993-1-8. Jeśli przyłożony w węźle obliczeniowy moment zginający M_{Ed} nie przekracza $(2/3)M_{Rd}$, to przyjmuje się że sztywność węzła jest stała i równa sztywności początkowej S_{ini} . Jeżeli jednak zachodzi $(2/3)M_{Rd} < M_{Ed} \leq M_{Rd}$ to sztywność węzła zmienia się nieliniowo, zgodnie z regułą

$$S = S_{ini}/\mu, \text{ gdzie } \mu = \left(\frac{1,5M_{Ed}}{M_{Rd}} \right)^{2,7}. \text{ Oznaczając przez } k_i$$

sztywności kolejnych sprężyn modelujących oddziaływanie składników węzła i stosując klasyczne podejście metody składnikowej uzyskuje się oszacowanie:

$$S_{ini} = \frac{Ez^2}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}} \tag{1}$$

3. Charakterystyka moment – obrót dla warunków pożaru budowana na podstawie analogicznej relacji odniesionej do podstawowej sytuacji projektowej.

Założmy, że rozpatrywany węzeł został poddany ekspozycji ogniowej. Poszukuje się zatem pęku relacji moment – obrót, z których każda odniesiona będzie do określonej temperatury węzła θ . Jeżeli stopień redukcji charakterystycznej granicy plastyczności stali, z której wykonane są elementy konstrukcyjne wyraża współczynnik $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$,

be reliable, even if the complex numerical models will be applied, when the modification of constraints behaviour for fire conditions, affecting the thermally generated strains, is neglected. Therefore, suitable design algorithms should be developed, which allow for effective consideration of the real response of loadbearing structure under fire. In part related to the description of joint stiffness changes when subject to fire such procedures in general are based on the generalisation of classical component method. They can, however, differ in details, leading in consequence to significantly different evaluations.

The aim of the presented paper is the comparison of two approaches, recommended for application in practice. The first one is based on the use of moment – rotation characteristic, known in advance and prepared for the analysed joint for persistent design situation. The resultant relations adequate for fire conditions are constructed by the appropriate modification of such initial characteristic. Algorithm of this type was presented in detail, by the authors, in [2] and [3], in accordance with formal suggestions given in [4]. The second approach discussed in this paper, being alternative in relation to that previously mentioned, is associated with the consideration of the temperature influence just on the early stage of the analysis, when the potential failure modes are identified, related to joint structural components. The next step is then the composition of such mechanisms according to the canon of component method. Typical beam-to-column steel joint with flush end-plate is selected by the authors for further detailed analysis.

2. Moment – rotation characteristic describing the joint behaviour in persistent design situation.

To construct the moment - rotation characteristic, dedicated to considered joint, the approach recommended in PN-EN 1993-1-8 is chosen to the study. If the bending moment M_{Ed} applied to this joint is not greater than $(2/3)M_{Rd}$ then the joint stiffness is assumed to be constant and equal to the initial value S_{ini} . However, in case when $(2/3)M_{Rd} < M_{Ed} \leq M_{Rd}$ occurs, such stiffness changes nonlinearly, in accordance with the rule

$$S = S_{ini}/\mu, \text{ where } \mu = \left(\frac{1,5M_{Ed}}{M_{Rd}} \right)^{2,7}. \text{ Denoting by } k_i \text{ the spring}$$

stiffness values, modelling the joint components behaviour, and applying the classical component method algorithm the following estimation is obtained:

3. Moment – rotation characteristic for fire conditions constructed based on the analogous relation dealing with persistent design situation.

Let us assume that the considered joint is subject to fire. In such case the set of moment – rotation characteristics is looked for, where each of those is associated with particular joint temperature value θ . If the reduction ratio specified for yield point of the steel the joint components are made of is given by $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$, whereas the reduction ratio related to elasticity

natomiast stopień redukcji modułu sprężystości tej stali współczynnik $k_{E,\theta} = E_\theta/E$, to można zauważyć, że zachodzi (szczegółowe wartości tych współczynników, skojarzone z wartościami temperatury stali θ , podano w normie PN-EN 1993-1-2):

$$S_{mi,\theta} = k_{E,\theta} S_{mi} \quad \text{oraz (and)} \quad M_{Rd,\theta} = k_{y,\theta} M_{Rd} \quad (2)$$

co jest bezpośrednią konsekwencją akceptacji założenia o identyczności stopnia redukcji siły w poszczególnych sprężynach, w danej temperaturze, czyli:

$$F_{i,Rd,\theta} = k_{y,\theta} F_{i,Rd} \quad (3)$$

Powyższe formuły pozwalają na wyznaczenie obrotu wężła:

modulus of such a steel grade is denoted by $k_{E,\theta} = E_\theta/E$, then it can be notice that (detailed values of such both factors are collected in PN-EN 1993-1-2, with respect to particular steel temperature values θ):

which is a direct consequence of the assumption that the reduction ratio related to the forces in particular springs is identical for particular temperature values, i.e.:

The above formulae lead to calculate the joint rotation:

$$\phi_\theta = \phi_{mi,\theta} = \frac{M_{Rd,\theta}}{S_{mi,\theta}} = \phi_{mi} \frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \quad (4)$$

Podobna sytuacja ma miejsce w zakresie obowiązywania nieliniowej relacji moment – obrót, wtedy bowiem:

The similar situation is in case when moment – rotation characteristic is nonlinear, because then:

$$\mu_\theta = \left(\frac{1,5 M_{Ed}}{M_{Rd,\theta}} \right)^{2,7} = \frac{\mu}{(k_{y,\theta})^{2,7}} \quad (5)$$

co daje:

which gives:

$$S_\theta = \frac{S_{mi,\theta}}{\mu_\theta} = k_{E,\theta} (k_{y,\theta})^{2,7} \frac{S_{mi}}{\mu} \quad \text{oraz (and)} \quad \phi_\theta = \frac{M_{Rd,\theta}}{S_\theta} = \phi_{mi} \frac{\mu}{k_{E,\theta} (k_{y,\theta})^{2,7}} \quad (6)$$

4. Charakterystyka moment – obrót dla warunków pożaru – podejście oparte na uogólnieniu metody składnikowej.

Rozpatrzenie możliwych schematów zniszczenia odniesionych do poszczególnych składników wężła i ich uogólnienie na przypadek pożaru prowadzi do zanegowania założenia danego formułą (3). Wprawdzie zachodzi:

$$M_{Rd,\theta} = \sum_i h_i F_{i,Rd,\theta} \quad (7)$$

gdzie h_i jest ramieniem działania sprężyny modelującej i -ty składnik wężła, niemniej jednak nie zawsze wartość siły $F_{i,Rd,\theta}$ maleje z temperaturą proporcjonalnie do czynnika $k_{y,\theta}$. W szczególności, analiza zachowania się króćca teowego, odpowiadającego pracy blachy czołowej pokazuje, że znaczący wpływ na odpowiedź tego składnika w pożarze ma również stopień redukcji wytrzymałości śrub, opisany współczynnikiem $k_{b,\theta}$ (PN-EN 1993-1-2).

5. Przykład numeryczny i uwagi końcowe

Szczegółowej analizie odniesionej do sytuacji pożaru poddano węzeł pokazany na Rys. 1. Wyniki obrazujące uzyskane dla tego wężła charakterystyki moment – obrót zestawiono na Rys. 3, przy czym linią ciągłą zaznaczono te, które wynikają z zastosowania algorytmu prezentowanego w rozdziale 3 niniejszej pracy, natomiast linią przerywaną te które są rezultatem uogólnienia metody składnikowej (rozdział 4). Łatwo zauważyć znaczące różnice ilościowe.

Zaprezentowana analiza pozwala twierdzić, że porównywane metody nie są równoważne. Wprawdzie wpływ redukcji wytrzymałości śrub, pomijany w podejściu

4. Moment – rotation characteristic for fire conditions – approach based on the generalization of component method.

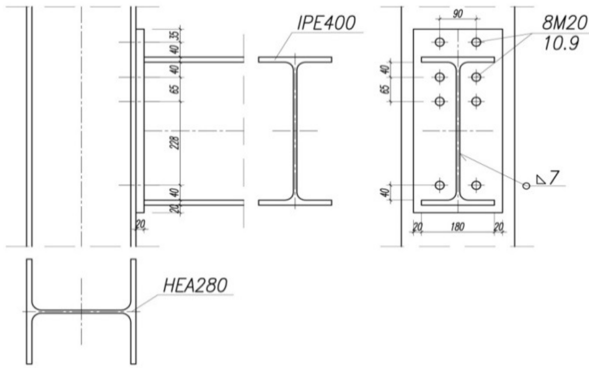
Detailed consideration of all potential failure modes related to particular joint components, and their generalization to the fire case, leads to the conclusion that the assumptions specified previously by Eq. (3) is questionable. Indeed, it is true that:

where h_i is a measure of the arm action related to the spring modelling the behaviour of i -th joint component; nevertheless, the resistance $F_{i,Rd,\theta}$ not always decreases proportionally to the factor $k_{y,\theta}$. Particularly, in case of the t-stub which is the model of the response of joint end plate, it is easy to conclude that the significant influence on its behaviour under fire exposure has also the reduction ratio of bolts tension resistance, quantified by the factor $k_{b,\theta}$ (PN-EN 1993-1-2).

5. Numerical example and concluding remarks

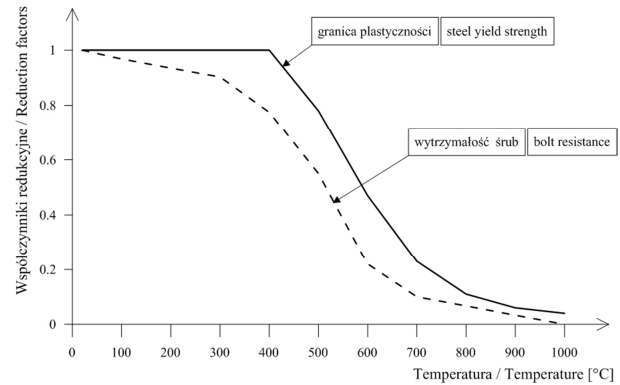
The joint presented in Fig. 1 was analysed in detail for fire conditions. The conclusive moment – rotation characteristics obtained for such input data are shown in Fig. 3. The relations marked by solid lines are related to those being the result of the application of the methodology described in chapter 3 of this paper. On the other side, the relations resulted from the generalization of the component method (chapter 4) are illustrated by the broken lines. It is easy to notice the significant quantitative differences. The analysis presented in this paper allows to conclude that the compared methodologies are not equivalent. In fact, the reduction of bolts tension resistance

uproszczonym, bazującym na tworzeniu charakterystyk moment – obrót na podstawie znanej a priori analogicznej charakterystyki odniesionej do podstawowej sytuacji projektowej, dotyczy jedynie niektórych składników węzła, to jednak brak uwzględnienia tego faktu w ogólnym bilansie oddziaływań w pożarze prowadzi do istotnego niedoszacowania podatności całego węzła. Różnice są szczególnie istotne, gdy temperatura węzła osiąga wartość 300°C , co wynika bezpośrednio z relacji pokazanej na Rys. 2.



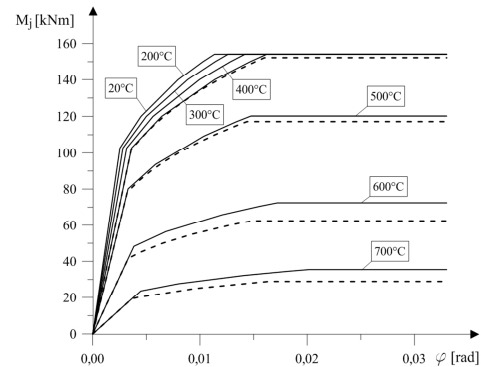
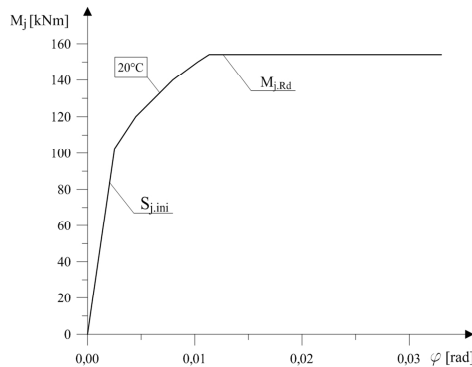
Rys. 1 Schemat węzła rozpatrywanego w pracy.
Fig. 1 Scheme of the joint considered in the presented paper.

under fire condition is related to only a few joint components; however, the neglecting such effect in global balance of all actions generated in considered joint under fire conditions, which is typical for the approach presented in chapter 3 of this paper, leads to significant underestimation of the whole joint flexibility. As one can see, the obtained quantitative differences becomes essential when the joint temperature exceeds the value 300°C , which is a direct consequence of the relation shown in detail in Fig. 2.



Rys. 2 Relacja pomiędzy redukcją w pożarze granicy plastyczności stali i redukcją wytrzymałości śrub na rozciąganie.

Fig. 2 Relation between the reduction ratios under fire conditions - related to the steel yield point and to the bolt tension resistance, respectively.



Rys. 3 Charakterystyki moment – obrót uzyskane dla węzła rozpatrywanego w przykładzie. Z lewej – charakterystyka wyjściowa opracowana dla podstawowej sytuacji projektowej, z prawej charakterystyki dla sytuacji pożaru. Linia ciągła – charakterystyki otrzymane poprzez transformację charakterystyki opisującej zachowanie rozpatrywanego węzła w podstawowej sytuacji projektowej. Linia przerywana – analogiczne charakterystyki zbudowane w oparciu o uogólnienie metody składnikowej.

Fig. 3 Moment – rotation characteristics obtained for joint considered in the example. The left side – the initial characteristic related to persistent design situation, the right side – the resultant characteristics connected to the fire situation. The solid line – characteristics obtained directly from the transformation of the initial characteristic, the broken lines – adequate characteristics generated by the generalization of component method.

Literatura • References

[1] Maślak M., Snela M. (2012), *Influence of increasing joint flexibility on critical temperature of steel frame in fire*, Zbirek Naukowych Prac Ukraińskiego Instytutu Stalowych Konstrukcji imieni W. M. Szimanowskiego, Wypusk 9/2012, Wydawnictwo "Stal", Kijów, Ukraina, s. 204-217,

[2] Maślak M., Pazdanowski M., Snela M. (2013), *Moment – rotation characteristics for flexible beam-to-column joint exposed to fire*, w: Stoyanov V., Hamova M., Partov D. (Eds.) – Proceedings of the 13th International Scientific Conference VSU' 2013, Sofia, Bulgaria, June 6-7, 2013, "L. Karavelov" Civil Engineering Higher School, Sofia, Bulgaria, vol. 1, s. I-26-I-31,

[3] Maślak M., Snela M. (2013), *Relacja moment – obrót w warunkach pożaru dla stalowego węzła rygiel – słup o znanej podatności*, Budownictwo i Architektura, 12 (2), 2013, s. 237-244,

[4] Simões da Silva L., Santiago A., Vila Real P. (2001), *A component model for the behavior of steel joints at elevated temperatures*. Journal of Constructional Steel Research, 57, s. 1169-1195.