dr hab. inż. Mariusz Maślak[a)*], prof. PK, mgr inż. Anna Tkaczyk[b)], mgr inż. Piotr Woźniczka[a)]

[a)] *Politechnika Krakowska / Cracow University of Technology*
[b)] *Biuro Budowlane „Bauko S.C.", Kielce*
**Autor korespondencyjny / Corresponding author: mmaslak@pk.edu.pl*

Użyteczność modelu obliczeniowego pojedynczej ramy poprzecznej w szacowaniu odporności ogniowej hali stalowej

The Usability of a Computational Model of a Single Transverse Frame in the Fire Resistance Assessment of an Entire Steel Hall

Полезность расчетной модели одиночной поперечной рамы в оценивании огнестойкости стального павильона

ABSTRAKT

Cel: Celem zaprezentowanych rozważań jest wypracowanie miarodajnej odpowiedzi na pytanie o wiarygodność stosowania modelu obliczeniowego pojedynczej ramy poprzecznej wyizolowanej ze złożonego ustroju nośnego hali stalowej w ocenie odporności ogniowej tej hali. Badanie zachowania się w pożarze pojedynczej ramy poprzecznej poprzez weryfikację kolejnych potencjalnie możliwych form jej zniszczenia umożliwia specyfikację poszukiwanej odporności interpretowanej jako określona dla tej ramy temperatura krytyczna, niezależna od przyjętego scenariusza rozwoju pożaru. Temperatura ta kojarzona jest jednoznacznie z osiągnięciem przez ustrój nośny analizowanej ramy stanu granicznego nośności ogniowej.

Metody: Do specyfikacji temperatury krytycznej wybranej ramy proponuje się procedurę obliczeniową opartą na uogólnionej na przypadek pożaru formule Merchanta-Rankine'a. Kwantyfikuje ona miarodajną nośność badanej ramy poprzez interakcję odpowiednich nośności skojarzonych z czysto sprężystą i czysto plastyczną formą jej zniszczenia. Opisano ograniczenia wybranej przez autorów metody oceny wynikające z konieczności akceptacji wielu upraszczających założeń formalnych. Pokazano również, jak na otrzymane rezultaty wpływa stopień złożoności zastosowanego modelu obliczeniowego.

Wyniki: Weryfikację i walidację proponowanej w artykule procedury obliczeniowej przeprowadzono porównując przemieszczenia wybranych węzłów ramy poprzecznej hali stalowej analizowanej dla warunków pożaru. Chodziło o sprawdzenie, jakiego typu i jak duże rozbieżności wynikają z zastosowania uproszczonego modelu dwuwymiarowego pojedynczej ramy w stosunku do wyników otrzymanych z analizy pełnego trójwymiarowego modelu ustroju nośnego całej hali.

Wnioski: Wykazano, że uproszczony model obliczeniowy pojedynczej ramy poprzecznej hali stalowej jest wystarczająco wiarygodny w przypadku, gdy o odporności ogniowej tej ramy decyduje pierwsza faza pożaru, gdy nie ma jeszcze znaczącego przyrostu prędkości deformacji elementów nośnych. Jeżeli jednak badana rama zapewnia bezpieczne przenoszenie przyłożonych do niej obciążeń także wtedy, gdy mamy do czynienia z dużymi deformacjami i znacznym osłabieniem elementów decydujących o nośności ramy, to oszacowanie prognozowanej odporności na podstawie modelu ograniczonego do pojedynczej ramy poprzecznej może być nazbyt optymistyczne. Nie uwzględnia bowiem przyspieszania ugięcia rygla przez ogrzane w pożarze płatwie dachowe rozciągane osiowo wskutek tak zwanego efektu cięgna.

Słowa kluczowe: hala stalowa, odporność ogniowa, rama poprzeczna, model obliczeniowy, podejście Merchanta-Rankine'a, nośność sprężysta, nośność plastyczna, temperatura krytyczna

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

Przyjęty: 10.08.2016; Zrecenzowany: 10.02.2017; Opublikowany: 31.03.2017;
Procentowy wkład merytoryczny: M. Maślak – 40%, A. Tkaczyk – 40%, P. Woźniczka – 20%;
Proszę cytować: BiTP Vol. 45 Issue 1, 2017, pp. 52–67, doi: 10.12845/bitp.45.1.2017.4;
Artykuł udostępniany na licencji CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

ABSTRACT

Aim: The aim of these considerations is to achieve a reliable answer to the question about the credibility of the use of a simple computational model with a single transverse frame isolated from a complex load-bearing structure of an entire steel hall in the fire resistance-evaluation of such a hall. The study of the behaviour of a simple transverse frame under fire conditions through checking all its potential failure modes allows to specify the required fire resistance which can be interpreted as the critical temperature set especially for this frame and being independent of the fire scenario adopted for the analysis. This temperature is unequivocally associated with the reaching by the frame load-bearing structure of the fire-resistance limit state.

Methods: The classical Rankine-Merchant formula generalised to the fire case is proposed to be used in the specification of the critical temperature for the transverse frame selected for the analysis. It quantifies the reliable bearing capacity of the tested frame through the interaction of the appropriate capacities associated with purely elastic and purely plastic failure modes. The limitations of the assessment method recommended by the authors are described in detail, resulting from the need for the acceptance of many formal assumptions simplifying the analysis. The impact of the complexity of the formal model adopted for the assessed frame fire-resistance evaluation on the obtained results is also verified.
Results: Both the verification and the validation of the computational procedure proposed by the authors in this article were performed by comparing the displacements of the selected nodes in the transverse frame analysed for fire conditions. The idea was to check what type of differences are obtained through the use of a simplified two-dimensional computational model of a single frame in relation to the corresponding results obtained when a complex three-dimensional model of the entire hall is considered, and how big they are.
Conclusions: It has been shown that the simplified computational model of a single transverse frame selected from the entire steel hall seems to be sufficiently reliable in the case in which fire resistance of such a frame is determined by the first phase of this fire, when the deformation rate of all bearing members is not yet significantly increased. However, if the tested frame also ensures the safe transfer of all loads applied to it when we are dealing with large deformations and large weakening of the members determining the real capacity of such a frame then the assessment of the predicted fire resistance obtained on the basis of the model limited to the analysis of only a single transverse frame might prove to be too optimistic. It does not account for the acceleration of the deflection of the frame beam due to the action of the heated purlins being in tension as a consequence of the so called catenary effect.
Keywords: steel hall, fire resistance, transverse frame, computational model, Rankine-Merchant approach, purely elastic resistance, purely plastic resistance, critical temperature
Type of article: original scientific article

Received: 10.08.2016; Reviewed: 10.02.2017; Published: 31.03.2017;
Percentage contribution: M. Maślak – 40%, A. Tkaczyk – 40%, P. Woźniczka – 20%;
Please cite as: BiTP Vol. 45 Issue 1, 2017, pp. 52–67, doi: 10.12845/bitp.45.1.2017.4;
This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

АННОТАЦИЯ

Цель: Целью дискуссии представляется разработка надежного ответа на вопрос о достоверности использования расчетной модели одиночной поперечной рамы, выделенной из сложной несущей конструкции стального павильона при оценке огнестойкости этого павильона. Изучение поведения в огне одиночной поперечной рамы, путем проверки других потенциально возможных форм ее разрушения позволяет определять искомую интерпретацию как указанную для этой рамы критическую температуру, независимо от сценария развития пожара. Эта температура однозначно связана с достижением несущей конструкцией анализированной рамы предельного состояния пожара.
Методы: Для определения критической температуры выбранной рамы предлагается процедура расчета на основе обобщенной на случай пожара формулы Мерчанта-Ранкина. Она квантифицирует достоверную несущую способность испытательной рамы через взаимодействие соответствующих несущих способностей, связанных с исключительно пружинистым и эластичным видом её разрушения. Авторами описаны ограничения выбранного метода оценки, связанные с необходимостью принятия ряда упрощающих формальных предположений. Также показано, как на полученные результаты влияет степень сложности использованной модели расчета.
Результаты: Проверка и подтверждение предлагаемой в статье процедуры расчета проводилась путем сравнения перемещения выбранных узлов поперечной рамы стального павильона, проанализированных в условиях пожара. Речь шла о проверке, какого типа и насколько велики различия обусловленные применением упрощенной двумерной модели одиночной поперечной рамы по отношению к результатам, полученным вследствие анализа полной трехмерной модели всей несущей конструкции павильона.
Выводы: Было доказано, что упрощенная расчетная модель одиночной поперечной рамы стального павильона является достаточно надежной, когда огнестойкость этой рамы определяется первой фазой пожара, когда еще нет значительного увеличения скорости деформации несущих элементов. Однако если тестированная рама и обеспечивает безопасный перенос приложенных к ней нагрузок, даже если мы имеем дело с большими деформациями и значительным ослаблением компонентов, определяющих несущую способность рамы, то оценка прогнозированного сопротивления на основе модели одиночной поперечной рамы может быть не слишком оптимистичной. Поскольку не учитывается ускорение отклонения нагретых пожаром болтов в прогонах крыши вытянутых в осевом направлении при воздействии, так называемого, эффекта сухожилия.
Ключевые слова: стальной павильон, огнестойкость, поперечная рама, расчетная модель, подход Мерчанта-Ранкина, несущая способность пружинистая и эластичная, критическая температура
Вид статьи: оригинальная научная статья

Принята: 10.08.2016; Рецензирована: 10.02.2017; Опубликована: 31.03.2017;
Процентное соотношение участия в подготовке статьи: M. Maślak – 40%, A. Tkaczyk – 40%, P. Woźniczka – 20%;
Просим ссылаться на статью следующим образом: BiTP Vol. 45 Issue 1, 2017, pp. 52–67, doi: 10.12845/bitp.45.1.2017.4;
Настоящая статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Wprowadzenie

W dobie współczesnych obliczeń komputerowych i powszechnego dostępu do profesjonalnego oprogramowania projektant typowej hali stalowej na ogół nie ma żadnych trudności w skonstruowaniu odpowiednio precyzyjnego trójwymiarowego modelu numerycznego złożonego z elementów prętowych

Introduction

In these days of modern computer-based calculations and common access to professional software, designers of typical steel halls usually have no problems with developing a sufficiently accurate 3D numerical model, consisting of bar elements, and demonstrating the structural form and geometry

i odwzorowującego zarówno układ konstrukcyjny, jak i geometrię nowo powstającego obiektu. W modelu tym uwzględnia on nie tylko wzajemne powiązania pomiędzy poszczególnymi elementami konstrukcyjnymi, w tym przede wszystkim różnokierunkowy charakter krępujących je więzów, ale również przestrzenny rozkład obciążeń zewnętrznych przyłożonych do ustroju nośnego. Niewątpliwie, uzyskane na podstawie takiej trójwymiarowej analizy statycznej i stowarzyszone z rozpatrywaną kombinacją oddziaływań pole sił wewnętrznych będzie znacznie bardziej wiarygodne od tego, które otrzymano by dla tej samej hali na podstawie konwencjonalnej analizy dwuwymiarowej odniesionej jedynie do pojedynczej ramy poprzecznej. O ile jednak zwyczaj zbierania obciążeń i specyfikacji wygenerowanych przez te obciążenia sił wewnętrznych prowadzonych na przestrzennym modelu całej konstrukcji stał się już w zasadzie klasycznym podejściem obliczeniowym, zwłaszcza wśród młodego pokolenia inżynierów [1], to następująca po tej analizie analiza wytrzymałościowa, pozwalająca na racjonalny dobór rozmiaru elementów przenoszących zidentyfikowane wcześniej obciążenia, sprowadza się nadal do analizy pojedynczej płaskiej ramy poprzecznej, wybranej jako miarodajna z całego rozpatrywanego ustroju. Potrzebne przekroje słupów i rygli kształtowanej przez projektanta ramy nośnej wynikają bowiem ze spełnienia odpowiednich warunków nośności specyfikowanych dla każdego z tych elementów w newralgicznych dla nich przekrojach poprzecznych, a także z warunków stateczności budowanych dla tych samych elementów potraktowanych jako całość. Nośność całej ramy determinuje zatem w takim ujęciu nośność słabszego z tych elementów, a w zasadzie mniejsza z dwóch granicznych wartości odniesionych do ich stateczności, oszacowanych osobno dla słupa i osobno dla rygla tej ramy. Podkreślmy przy tym, że warunki miarodajne do wyznaczenia tej nośności wykalibrowane są przy założeniu sprężysto-plastycznej pracy ustroju, tak aby uwzględniały przestrzenną interakcję rozmaitych potencjalnie możliwych form globalnej niestateczności pojedynczych prętów. Najczęściej jest to złożenie kryterium zwichrzenia rygla lub słupa uaktywniającego się wskutek zginania i wyboczenia giętnego będącego skutkiem ściskania towarzyszącego temu zginaniu. Ważne że w takim podejściu, analizując jedynie płaską ramę poprzeczną, można zweryfikować ryzyko wystąpienia globalnej formy niestateczności nie tylko w płaszczyźnie samej ramy (*in-plane buckling*), ale i na kierunku do tej płaszczyzny prostopadłym (*out-of-plane buckling*). Szacowanie nośności całej ramy w sposób tradycyjny, to znaczy jako minimum nośności (stateczności) pojedynczych prętów formujących tę ramę, budzi jednak pewne wątpliwości. Przy tego typu analizie nie wiąże się bowiem w sposób jednoznaczny wyczerpania możliwości przenoszenia przyłożonych do tej ramy obciążeń zewnętrznych z konkretną formą (wzorcem) jej zniszczenia, czyli z tzw. *failure mode*. Taka miarodajna forma zniszczenia jest niejako atrybutem całej ramy i nie musi być w żaden sposób odniesiona do degradacji pojedynczego pręta. Oczywiście, zniszczenie samego tylko rygla albo samego słupa z reguły będzie równoznaczne z awarią całej ramy, niemniej jednak relacja odwrotna nie musi zachodzić. Chodzi o to, że przy analizie jedynie pojedynczego pręta ramy można nie zauważyć na przykład takiego zlokalizowania przegubów plastycznych uaktywniających się w jego otoczeniu, które

of the building being created. This model takes into account not only the interconnections between individual structural elements, including in particular the multidirectional nature of bonds, but also the spatial distribution of external loads on the load-carrying structure. Undoubtedly, the internal force field obtained on the basis of such a three-dimensional static analysis, and associated with the combination of interactions in question, will be much more reliable than the one which would be obtained for the same hall based on a conventional two-dimensional analysis relating only to a single transverse frame. While the practice of collecting loads and specifications generated by these internal force loads on a spatial model of the entire structure has practically become the classical computational approach, especially among the younger generation of engineers [1], the strength analysis following this analysis, which makes it possible to rationally select the size of elements to bear the previously identified loads, still boils down to analysing a single flat transverse frame, selected as representative for the entire system under consideration. The required sections of columns and girts in the load-bearing frame shaped by the designer result from meeting the appropriate load capacity requirements, specified for each of those elements in their crucial cross sections, as well as from the stability conditions created for the same elements, treated as a whole. The load capacity of the entire frame is therefore determined by the load capacity of the weakest of those elements, and, in particular, the lower of the two border values in relation to their stability, estimated separately for the column and the girt of the frame. It is worth highlighting that the reliable conditions for the determination of load capacity are calibrated taking into account the elasto-plastic operation of the system, to make them include the spatial interaction between various potential forms of the global instability of individual bars. Usually this is the criterion for the lateral torsional buckling of a girt or column, as a result of bending or flexural buckling due to compression associated with bending. It is important in such an approach that by analysing only the flat transverse frame one can verify the risk of global instability, not only of in-plane buckling, but also of out-of-plane buckling. There are, however, some doubts in relation to the estimation of the load capacity of the entire frame in a traditional way, i.e. as the minimum load capacity (stability) of individual bars forming the frame. In such an analysis the exhaustion of the capacity to bear external loads on the frame is not clearly associated with any specific form (model) of its failure, i.e. the so-called failure mode. Such a representative form of failure is to some extent an attribute of the entire frame and cannot be in any way related to the degradation of any individual bar. Of course the failure of a single girt or column will usually cause the failure of an entire frame; however, the opposite relation might not appear. This means that when analysing a single frame bar one might not notice, for example, such a location of plastic hinges' becoming active in one's environ, which creates a risk of activating a kinematically allowed movement mechanism. In many practically important design cases it is worth juxtaposing the estimated load capacity of the frame based on the traditional

 ISSN 1895-8443

grozi uruchomieniem kinematycznie dopuszczalnego mechanizmu ruchu. W wielu praktycznie ważnych przypadkach projektowych warto skonfrontować oszacowanie nośności ramy uzyskane po zastosowaniu tradycyjnej procedury obliczeniowej z alternatywnym rozwiązaniem wynikającym na przykład z wykorzystania półempirycznej formuły Rankine'a-Merchanta typu:

$$\frac{1}{N_{RM}} = \frac{1}{N_{el}} + \frac{1}{N_{pl}} = \frac{N_{el} + N_{pl}}{N_{el} N_{pl}} \tag{1}$$

Wypada podkreślić, że w bieżącym roku obchodzimy okrągłą 150 rocznicę opublikowania tej zależności [2]. Przybierała ona zresztą różne formy. Tu wspomnimy chociażby taką, w której nośnościom N_{el} i N_{pl} towarzyszył kalibrowany i interpretowany w różny sposób wykładnik *n* [3]. Zgodnie z podejściem sformalizowanym równaniem (1) miarodajna nośność ramy N_{RM} (indeks *RM* oznacza tu zbitkę nazwisk Rankine-Merchant) jest determinowana przez interakcję specyfikowanych dla całej ramy, nie zaś osobno dla rygla i dla słupa, nośności: czysto sprężystej N_{el} i czysto plastycznej N_{pl}. Trzeba jednak bardzo mocno podkreślić, że nie jest ona prostym minimum obu tych nośności, ale jest od każdej z nich wyraźnie mniejsza. Użyteczność formuły (1) była wielokrotnie weryfikowana, zwłaszcza dla podstawowej sytuacji projektowej [4]. Uogólniano ją także na wyjątkową sytuację projektową pożaru rozwiniętego. Wystarczy wspomnieć na tym polu na przykład prace Skowrońskiego [5] czy Toha, Tana i Funga [6]. W pracy [7] jeden z autorów niniejszego artykułu pokazał, jak przy szacowaniu odporności ogniowej ramy stalowej z zależności (1) wyprowadzić klasyczny współczynnik wyboczeniowy, jakościowo i ilościowo różny od analogicznego współczynnika rekomendowanego w normie PN-EN 1993-1-2 [8]. W tym opracowaniu autorzy stawiają sobie za cel weryfikację użyteczności stosowania formuły (1) do zagadnień szacowania odporności ogniowej ustroju nośnego hali stalowej. Chodzi o sprawdzenie, na ile i czy w ogóle rozwiązania uzyskane z analizy pojedynczej ramy poprzecznej będą mogły być interpretowane jako charakterystyki miarodajne dla całego badanego obiektu. Spróbujemy przy tym zakreślić ograniczenia stosowalności wzoru (1). Sprawdzimy również, jaki wpływ na zgodność otrzymanych wyników z rezultatami bardziej złożonej analizy numerycznej będzie miał sposób zamodelowania istniejących warunków brzegowych.

Kwestia miarodajnego scenariusza pożarowego

W rozważaniach dotyczących szacowania odporności ogniowej hali stalowej mamy do czynienia z ustrojem nośnym poddanym działaniu specyficznej kombinacji oddziaływań zewnętrznych identyfikowanej dla wyjątkowej sytuacji projektowej. Oznacza to, że w odniesieniu do obciążeń zmiennych sumowane są ich efekty chwilowe, nie zaś opracowane dla tych efektów statystycznie uzasadnione najbardziej prawdopodobne maksima wyliczane w odpowiednim okresie odniesienia. Tak określone pole obciążeń wywołuje w konstrukcji jednoznacznie z nim skojarzony stan deformacji. Oddziaływanie pożaru w chwili jego zainicjowania nakłada się zatem, co trzeba wyraźnie

computational procedure and the alternative solution resulting from the use of, e.g., a semi-empirical Rankine-Merchant formula, such as

$$\frac{1}{N_{RM}} = \frac{1}{N_{el}} + \frac{1}{N_{pl}} = \frac{N_{el} + N_{pl}}{N_{el} N_{pl}} \tag{1}$$

It is worth underlining that this year we are celebrating the 150th anniversary of the publication of this interrelation [2]. It took various forms. Here we refer to one in which load capacities N_{el} and N_{pl} were accompanied by a calibrated exponent *n* [3], which was interpreted in a number of ways. In line with the approach formalised by the equation (1), the representative load capacity of the frame N_{RM} (the *RM* index means here Rankine-Merchant) is determined by the interaction of purely elastic N_{el} and purely plastic N_{pl} load capacities specified for the entire frame, and not individually for the girt and column. It should be, however, very strongly emphasised that this does not constitute a simple minimum of both these load capacities, but is markedly lower than any of them. The usefulness of formula (1) was verified on multiple occasions, especially for the underlying design circumstances [4]. It was also generalised for the exceptional cases of a fully developed fire. In this respect it would suffice to consult the works of Skowroński [5] Toh, Tan and Fung [6]. In [7] one of the authors of this article showed how, in the assessment of the fire resistance of a steel frame, to derive from interrelation (1) the classic buckling factor, different in qualitative and quantitative terms from the analogous factor recommended in PN-EN 1993-1-2 [8]. In this study the authors aim to verify the usability of formula (1) in respect of estimating the fire resistance of a steel hall's load bearing structure. This means evaluating to what extent, and if at all, the solutions derived from analysing a single transverse frame can be interpreted as characteristics representative of the entire tested facility. We will also attempt to determine the limitation on the use of formula (1). Finally we will check the impact of the manner of modelling the existing boundary conditions on the conformity of the obtained results with the results of a more complex numerical analysis.

The issue of a representative fire scenario

In deliberations concerning the estimation of the fire resistance of a steel hall, we are dealing with a load-carrying structure subject to a specific combination of external impacts, identified for a specific design situation. This means that, in relation to variable loads, the summed values are momentary effects, and not the statistically justified, most probable maximums, developed for these effects, and calculated in the correct reference period. A load field determined in such a way triggers in the structure a state of deformity unambiguously associated with it. The effect of a fire at the moment of its start is therefore cumulative, which should be clearly highlighted, on a pre-deformed

podkreślić, na wstępnie odkształcony ustrój nośny, nie zaś na idealizowaną konstrukcję typu „perfect". Poza tym efekt tego pożaru zmienia się w czasie jego trwania. Zależy przy tym od rodzaju, ilości i rozmieszczenia potencjalnego paliwa oraz od możliwości wymiany tlenu z otoczeniem. Zawsze jednak, zsumowany z efektami oddziaływań zewnętrznych, będzie decydował o faktycznej odporności ogniowej analizowanej hali, to znaczy o czasie, przez który jej ustrój nośny będzie w tych warunkach zdolny do bezpiecznego przenoszenia sił wewnętrznych wygenerowanych w ryglach i słupach. Wyznaczenie tej odporności najprościej skojarzyć z polem temperatury zwyczajowo specyfikowanym dla elementów konstrukcyjnych w kolejnych chwilach pożaru, takim aby towarzyszyło mu osiągnięcie przez rozważany ustrój stanu granicznego nośności ogniowej. Jeżeli możliwe będzie wyspecyfikowanie dla takiego pola arbitralnie wybranej pojedynczej wartości temperatury stali Θ_a interpretowanej w tym przypadku jako temperatura odniesienia, to wartość taką uzna się wtedy za temperaturę krytyczną miarodajną dla całej ramy poprzecznej. Tego typu podejście wymaga jednak zaakceptowania upraszczającego założenia o jednoparametrycznym opisie rozwoju temperatury w budujących tę ramę elementach konstrukcyjnych. Chodzi o to, aby przyjąć, że wraz z rozwojem pożaru temperatura stali narasta we wszystkich tych elementach proporcjonalnie do jednego wspólnego mnożnika α, takiego że w newralgicznym punkcie rozpatrywanego ustroju nośnego zachodzi $\Theta_{a,cr} = \alpha_{cr}\Theta_a$, co oznacza, że $\alpha_{cr} = \alpha(\Theta_{a,cr})$. Oczywiście, takie założenie budzi natychmiastowy sprzeciw, wystarczy bowiem, aby na rygle i na słupy analizowanej ramy zastosować różne kształtowniki stalowe, o różnych wartościach tak zwanego współczynnika ekspozycji (stosunku nagrzewanego obwodu przekroju poprzecznego do pola powierzchni tego przekroju), aby rozwój temperatury w tych elementach nie był w żaden sposób proporcjonalny. Zauważmy jednak, że w przypadku analizy elementów stalowych pozbawionych jakiejkolwiek izolacji przeciwogniowej różnice w temperaturze ogarniętych przez pożar słupów i rygli, wyznaczone za każdym razem dla tej samej chwili pożaru, są na tyle małe, że stają się w zasadzie nieistotne dla ilościowego oszacowania odporności ogniowej badanej ramy. Dodajmy do tego fakt stosunkowo szybkiego wyrównywania się temperatury w tego typu nieosłoniętych przed ogniem elementach stalowych, nie tylko w wybranych przekrojach poprzecznych, ale po prostu na całej długości tych elementów. Wydaje się zatem, że w praktycznie ważnych przypadkach obliczeniowych przypisanie rozważanemu nieizolowanemu elementowi stalowemu pojedynczej wartości temperatury charakteryzującej stopień jego nagrzania w wybranej chwili pożaru i zastąpienie tą temperaturą skojarzonej z tą samą chwilą przestrzennej mapy temperatury wynikającej z rozbudowanej analizy numerycznej, nie prowadzi do istotnego ryzyka popełnienia znaczącego błędu ilościowego. Numeryczna weryfikacja tak postawionej hipotezy jest jednym z celów badań prowadzonych obecnie przez trzeciego z autorów niniejszej pracy.

Podkreślmy, że tego typu podejście do analizy jest w zasadzie równoważne założeniu, że miarodajnym dla oceny odporności ogniowej rozpatrywanej ramy poprzecznej jest pożar w pełni rozwinięty (*fully-developed fire*), czyli taki, dla którego został osiągnięty punkt rozgorzenia (*flashover point*). W takim pożarze można

load-carrying structure, and not on an idealised, perfect structure. Furthermore, the effects of the fire change as the fire develops. It also depends on the type, quantity and location of potential fuels, and on the possibility of oxygen exchange with the environment. However, always when aggregated with the effects of external impacts, it will condition the actual fire resistance of the analysed hall, i.e. the time for which its load-carrying structure will be able to safely transfer, under these conditions, the internal forces generated in girts and columns. The determination of this resistance is the easiest to associate with the temperature field usually specified for members in subsequent moments of the fire, so that the load-carrying structure in question could be found in the endurance limit state. If it is possible to specify for such a field an arbitrary single value of the steel temperature Θ_a, interpreted in this case as the reference temperature, then such a value should be regarded as critical temperature, representative of the entire transverse frame. Such an approach requires one to accept a simplifying assumption on the uni-parametric description of temperature development in the frame members. This means assuming that as the fire develops, the steel temperature increases in all those members proportionally to one common multiplier α, such that in the critical point of the system in question, we get $\Theta_{a,cr} = \alpha_{cr}\Theta_a$, which means that $\alpha_{cr} = \alpha(\Theta_{a,cr})$. Of course such an assumption provokes immediate opposition, as it would suffice for the girts and columns in the analysed frame to be made of different steel sections, with different values for the so-called exposure factor (the ratio of heated circumference of cross-section to the area of this cross-section), for the temperature development in those elements to be completely unproportional. It should be noted, however, that in the case of analysing steel members with no thermal insulation whatsoever, the differences in temperatures of columns and girts exposed to fire, determined every time for the same moment of fire, are so small that they become basically insignificant for the quantitative estimation of the fire resistance of the tested frame. We should also mention here the fact of a relatively quick balancing of temperature in such steel members not shielded against fire, not only in the selected cross-sections, but along the entire length of these members. It therefore appears that in practically relevant computational cases, the ascribing of a single temperature value characterising its degree of heating in the selected moment of fire, to the analysed non-insulated steel member, and replacing the spatial map of temperatures resulting from extended numerical analysis with the aforementioned temperature, does not lead to a significant risk of making a serious quantitative error. The numerical verification of a hypothesis put forward in such a way is one of the objectives of the studies being conducted at present by the third author of this paper.

We would like to underline that such an approach to the analysis practically amounts to the assumption that a fully-developed fire, i.e. a fire which has reached the flashover point, is representative of the evaluation of the fire resistance of the transverse frame in question. In such a fire we can assume that the temperature of the exhaust gases affecting the structural elements at any point of the fire is steady throughout the entire fire zone, but increases over time [9]. The problem is that

 ISSN 1895-8443

przyjmować w każdej chwili jego trwania wyrównaną w całej strefie pożarowej, ale narastającą w czasie temperaturę gazów spalinowych oddziałujących na elementy konstrukcyjne [9]. Problem w tym, że w realnych warunkach do rozgorzenia pożaru dochodzić będzie raczej w halach stosunkowo małych o ograniczonych rozmiarach i kubaturze, przy równomiernie rozłożonym obciążeniu ogniowym. Wszędzie tam, gdzie mamy do czynienia z halą wysoką albo z obiektem wielkopowierzchniowym, miarodajnym do oceny nośności ustroju w pożarze wydaje się być pożar oddziałujący lokalnie. Z uwagi jednak na wielość takich możliwych do realizacji i ograniczonych w przestrzeni scenariuszy pożarowych na ogół przyjmuje się, że obliczeniowy pożar rozwinięty modelowany w całej objętości hali stanowi swego rodzaju obwiednię potencjalnie zagrażających ocenianej konstrukcji lokalnych oddziaływań termicznych. W takim ujęciu zakłada się, że odporność ogniowa hali uzyskana dla pożaru rozwiniętego będzie zawsze niedoszacowana, a więc pozostająca po stronie bezpiecznej, w stosunku do odporności, którą uzyskano by w przypadku rozważania lepiej odpowiadającego rzeczywistym warunkom pożaru lokalnego. Konstatacja ta nie zawsze jednak musi być prawdziwa, co pokazano na przykład w pracy [10]. W wielu praktycznie istotnych sytuacjach projektant może jednak dość precyzyjnie zinwentaryzować istniejące obciążenie ogniowe zgromadzone w badanej hali, a zatem i zlokalizować strefy, w których jest ono na tyle duże, że w przypadku zaistnienia pożaru wygeneruje pożar lokalnie zagrażający konstrukcji nośnej, ale także i takie, gdzie obciążenie to nie stanowi potencjalnego zagrożenia i może być pominięte w obliczeniach [11]. Wtedy miarodajnym do szacowania nośności ogniowej całej hali może być chociażby ograniczony w przestrzeni pożar rozwinięty, dla którego intensywność rozwoju temperatury gazów spalinowych, a także wartość dyssypowanej energii będą ustalane w zależności od rodzaju i rozmieszczenia faktycznie zinwentaryzowanego obciążenia ogniowego. Dokładne omówienie metodyki racjonalnego modelowania pożaru miarodajnego do analizy odporności ogniowej hal stalowych wymaga osobnego i stosunkowo obszernego artykułu znacznie wykraczającego poza ramy niniejszego opracowania. Zaznaczmy jedynie, że zaproponowanie odpowiednich, merytorycznie i ekonomicznie uzasadnionych, strategii postępowania na tym polu stanowi cel pracy doktorskiej trzeciego z autorów tej pracy.

Odporność ogniowa ustroju nośnego hali stalowej a temperatura krytyczna pojedynczej ramy poprzecznej tej hali

Prognozowana na podstawie obliczeń wartość odporności ogniowej analizowanej hali stalowej, specyfikowana dla całej konstrukcji jako czas, przez który w warunkach pożaru pozostanie ona zdolna do bezpiecznego przenoszenia przyłożonych do niej obciążeń, może zostać formalnie wyznaczona jedynie wtedy, gdy procedurę jej szacowania skojarzy się w sposób jednoznaczny z charakterystyką pożaru miarodajnego dla tej hali, odpowiadającego najbardziej niekorzystnemu, ale potencjalnie możliwemu scenariuszowi ekspozycji ogniowej. Wystarczy jednak dokonać zmiany przyjętego wcześniej pożaru odniesienia, aby uzyskać całkowicie odmienne oszacowanie odporności ogniowej badanego obiektu. W takim ujęciu odporność ta nie może zatem zostać

in actual conditions the flashover will occur in rather small halls, with limited dimensions and cubage, with an even distribution of the fire load. In any situation in which we are dealing with a high hall or a large-area facility, a local fire appears to be representative for assessing the load-bearing capacity in fire conditions. However, due to the extent of such implementable and spatially restricted fire scenarios, it is generally assumed that the computational developed fire, modelled for the entire volume of the hall, constitutes a kind of envelope for local thermal impacts which can potentially jeopardise the assessed structure. In such an approach, it is assumed that the fire resistance of a hall for a developed fire will always be underestimated, and thus remaining on the safe side, when compared to ratings obtained in evaluating a local fire more akin to the actual circumstances. This statement might not be always true, as demonstrated based on [10]. In many practically relevant situations, designers can fairly accurately determine the existing fire loads present in the analysed hall, and therefore locate the zones in which the loads are so great that a fire will generate a fire locally threatening the structural system, but also those zones in which loads do not constitute potential hazards and can be disregarded in calculations [11]. Then, the factor representative for the estimation of the fire endurance of the entire hall can be a spatially-limited developed fire, for which the intensity of plume gas temperature growth and the value of dissipated energy will be determined depending on the type and distribution of actually determined fire loads. To thoroughly discuss the methodology of rational fire modelling, which would be representative of the analysis of the fire resistance of steel halls, would require a separate and relatively extensive article, which would go beyond the framework of this study. We would like to highlight, though, that proposing appropriate, substantially and economically valid strategies for procedures in this field is the objective of a doctoral dissertation of the third author of this paper.

The fire resistance of the load-bearing structure of a steel hall, and the critical temperature of a single transverse frame of the hall

The value of the fire resistance of the analysed steel hall, forecast on the basis of computation, specified for the entire structure as the time in which it can safely transfer loads in fire conditions, can be formally determined only when the estimation procedure is unambiguously associated with the characteristics of the fire representative of the hall, corresponding to the most-unfavourable, but potential, scenario of fire exposure. However, if the previously adopted reference fire is changed, the estimation of the fire resistance of the given facility can be drastically different. In such a depiction, the resistance cannot be regarded as an objective measure of safety, ascribed to the system

uznana za obiektywną miarę bezpieczeństwa przypisaną do rozpatrywanego ustroju. Jeżeli jednak poszukiwaną odporność wyrazimy nie jako oczekiwany czas, ale poprzez temperaturę krytyczną specyfikowaną dla wybranego wcześniej punktu ustroju nośnego pojedynczej ramy poprzecznej, taką, po osiągnięciu której cały ten ustrój ulega destrukcji, to temperatura ta zależeć będzie głównie od schematu statycznego badanej konstrukcji i sposobu jej ogrzewania w pożarze (globalnego lub lokalnego) nie zaś od tego, jak szybko przebiega rozwój tego pożaru i czy jest to pożar, który rozgorzał i oddziałuje równomiernie w całej strefie pożarowej, czy też osiągnął on fazę pożaru rozwiniętego jedynie w bezpośrednim otoczeniu rozpatrywanej ramy poprzecznej. Temperatura krytyczna w takim podejściu jest zatem niejako atrybutem samej konstrukcji, co oznacza, że w zasadzie nie ma konieczności odnoszenia jej do przebiegu konkretnego pożaru. W ocenie autorów niniejszej pracy wielkość tę można potraktować jako obiektywną miarę bezpieczeństwa, stosunkowo łatwą do ilościowego oszacowania i dającą duże możliwości prowadzenia efektywnego i racjonalnego wnioskowania co do realnego poziomu ryzyka w pożarze. Prostota analizy okupiona jest tu jednak pewnymi ograniczeniami, których oceniający musi być świadomy przy interpretacji uzyskanych wyników. Wiele z nich komentujemy w tym artykule. Najważniejszym z tego rodzaju ograniczeń wydaje się jednak to, że temperatura krytyczna może być formalnie przypisana co najwyżej do pojedynczej ramy poprzecznej rozpatrywanej hali. Ze względu na złożoność analizy i rozmaitość skojarzonych z nią potencjalnie możliwych form zniszczenia trudno bowiem wyobrazić sobie możliwość zidentyfikowania jej wartości dla ustroju nośnego całego analizowanego obiektu. Pytanie o wiarygodność i użyteczność modelu takiej pojedynczej ramy w szacowaniu odporności ogniowej całej hali stalowej nabiera w takim kontekście fundamentalnego znaczenia.

in question. If, however, the sought resistance is expressed not as the expected time, but through the critical temperature specified for the previously selected point in the load bearing structure of a single transverse frame – the temperature which, when reached, causes the entire structure to be destroyed, then the temperature will depend mainly on the static schema of the examined structure and the manner of its heating during the fire (global or local), and not on the rapidity of fire development, or whether there was a flashover, and the fire affects equally the entire fire zone, or whether it has reached the developed stage only in the immediate vicinity of the transverse frame in question. The critical temperature in this approach is therefore, to some extent, an attribute of the structure itself, which means that there is basically no need to relate it to the course of a given fire. According to the authors of this study, this value can be treated as an objective measure of safety, relatively easy to assess in quantitative terms, and providing substantial opportunities for drawing effective and rational conclusions in respect of the real level of risk during the fire. The simplicity of analysis here comes at the price of some limitations, of which the evaluator needs to be aware when interpreting the obtained results. Many of these are commented on in this article. The most important of such limitations appears to be the fact that the critical temperature can be formally ascribed at most to a single transverse frame of the analysed hall. Due to the complexity of the analyses and the variety of the potential forms of failure associated with it, it is difficult to imagine it being possible to identify its value for the load-bearing structure of the entire facility. The question of the reliability and usability of the model of such a single frame in the estimation of the fire resistance of the entire hall becomes fundamental in such a context.

Proponowana ocena odporności ogniowej pojedynczej ramy poprzecznej hali stalowej oparta na uogólnionej regule Rankine'a-Merchanta

Jak zaznaczono we wstępie, w niniejszych rozważaniach do oceny odporności ogniowej pojedynczej ramy poprzecznej ustroju nośnego hali stalowej proponujemy opracowaną przez nas procedurę opartą na uogólnieniu półempirycznej reguły Rankine'a-Merchanta. Jej kolejne kroki są następujące:

- dla analizowanej ramy wyznacza się nośność $N_{pl,\Theta}$ skojarzoną z czysto plastyczną formą jej zniszczenia (dolny indeks Θ oznacza tu sprzężenie tej wielkości z temperaturą $\Theta_{gr,pl}$ interpretowaną jako temperatura krytyczna określona dla tej ramy, czyli po prostu temperatura odniesienia, po osiągnięciu której zniszczenie tego typu jest realizowane),
- nośność $N_{pl,\Theta}$ odpowiada najniższej wartości temperatury odniesienia, dla której możliwa staje się realizacja jakiegokolwiek kinematycznie dopuszczalnego mechanizmu ruchu, co oznacza, że $\Theta_{gr,pl} = \min_k \Theta_{gr,pl,k}$, gdzie $k = 1,..,m$ jest oznaczeniem kolejnego rozpatrywanego mechanizmu,

The proposed evaluation of the fire resistance of a single transverse frame of a steel hall, based on the generalised Rankine-Merchant rule

As indicated in the introduction to these deliberations, to evaluate the fire resistance of a single transverse frame of the load-bearing structure of a steel hall, we propose a procedure that we have developed, which is based on the generalisation of the semi-empirical Rankine-Merchant rule. Its subsequent steps are as follows:

- for the analysed frame the load-bearing capacity is determined as $N_{pl,\Theta}$, associated with the purely plastic form of failure (the lower index Θ means here the conjugation of this value with temperature $\Theta_{gr,pl}$ interpreted as the critical temperature for the frame, i.e. simply the reference temperature, which, when reached, means the failure of the given type),
- the load-bearing capacity $N_{pl,\Theta}$ corresponds to the lowest value of the reference temperature, for which any kinematically permissible movement mechanism is possible, which means that, $\Theta_{gr,pl} = \min_k \Theta_{gr,pl,k}$, where $k = 1,..,m$ is the designation of the next analysed mechanism,

ISSN 1895-8443

– wyznaczoną wartość nośności $N_{pl,\Theta}$ kojarzy się z odpowiadającą jej temperaturą $\Theta_{gr,pl}$ (oczywiście zachodzi przy tym $N_{pl,\Theta} = \min_k N_{pl,\Theta,k}$), a następnie dla tej wartości temperatury wyznacza nośność $N_{el,\Theta} = N_{el}(\Theta_{gr,pl})$ stowarzyszoną z czysto sprężystą postacią utraty stateczności ramy,
– znając wartości nośności składowych, odpowiednio $N_{pl,\Theta}$ i $N_{el,\Theta}$, wyznaczone dla tej samej granicznej temperatury $\Theta_{gr,pl}$, na podstawie klasycznej reguły Rankine'a-Merchanta wyznacza się poszukiwaną odporność ogniową analizowanej ramy, czyli $N_{RM,\Theta}$, a zatem:

$$\frac{1}{N_{RM,\Theta}} = \frac{1}{N_{el,\Theta}} + \frac{1}{N_{pl,\Theta}} \tag{2}$$

co oznacza, że:

$$N_{RM,\Theta} = \frac{N_{el,\Theta} N_{pl,\Theta}}{N_{el,\Theta} + N_{pl,\Theta}} \tag{3}$$

– oszacowaną w taki sposób odporność ogniową $N_{RM,\Theta}$ specyfikowaną dla pojedynczej ramy poprzecznej hali stalowej kojarzy się zatem w sposób jednoznaczny z temperaturą krytyczną $\Theta_{gr,pl}$ wyznaczoną wcześniej przy założeniu, że czysto plastyczny mechanizm ruchu będzie decydował o zniszczeniu badanej ramy,
– proponowana procedura daje miarodajne oszacowanie nośności ogniowej analizowanej ramy wtedy i tylko wtedy, gdy prawdziwa jest nierówność:

$$\Theta_{gr,pl} \le \Theta_{gr,el} \tag{4}$$

w której przez $\Theta_{gr,el}$ oznaczono temperaturę odniesienia, po osiągnięciu której następuje czysto sprężyste wyboczenie całej ramy lub dowolnego jej elementu (słupa, rygla),
– jeżeli nierówność (4) nie zachodzi, to za krytyczną temperaturę ramy przyjmuje się wartość $\Theta_{gr,el}$, a następnie dla niej wylicza się nośność $N_{RM,\Theta}$ przy czym w takiej sytuacji obliczeniowej nośność $N_{pl,\Theta}$ jest plastyczną nośnością przekroju poprzecznego miarodajnego elementu ramy (rygla lub słupa) przy czystym zginaniu (wtedy $N_{pl,\Theta} = W_{pl} k_{y,\Theta} f_y$ – wartość $k_{y,\Theta} f_y$ jest tu granicą plastyczności stali, z której wykonano elementy ramy, zredukowaną w temperaturze Θ natomiast W_{pl} niezależnym od tej temperatury wskaźnikiem oporu plastycznego miarodajnego przekroju poprzecznego) z ewentualnym uwzględnieniem interakcji z siłą podłużną i/lub siłą poprzeczną.

Temperaturę krytyczną $\Theta_{gr,el}$ odpowiadającą czysto sprężystej postaci zniszczenia ramy wyznacza się na ogół, korzystając z konwencjonalnych procedur klasycznej teorii stateczności sprężystej [12]. W ujęciu zaproponowanym przez nas w przypadku, gdy o zniszczeniu ramy decyduje jej sprężyste wyboczenie, jako granicę skojarzonej z tą sytuacją nośności plastycznej przyjęliśmy moment uaktywnienia się pierwszego przegubu plastycznego, co jest pewnym przybliżeniem. Oczywiście dopuszczając do pojawienia się kolejnych przegubów plastycznych, niejako zakłada się, że w przekrojach krytycznych, w których przeguby te potencjalnie wystąpią, będzie wystarczająca

– the determined value of load-bearing capacity $N_{pl,\Theta}$ is associated with the corresponding temperature $\Theta_{gr,pl}$ (of course with $N_{pl,\Theta} = \min_k N_{pl,\Theta,k}$ taking place), and next for this temperature value load-bearing capacity $N_{el,\Theta} = N_{el}(\Theta_{gr,pl})$ is determined, associated with the purely elastic form of frame stability failure,
– knowing the values of the component load-bearing capacities $N_{pl,\Theta}$ and $N_{el,\Theta}$, determined for the same temperature limit $\Theta_{gr,pl}$, based on the classic Rankine-Merchant rule, the sought fire resistance of the analysed frame, i.e. $N_{RM,\Theta}$ is determined, and therefore:

$$\frac{1}{N_{RM,\Theta}} = \frac{1}{N_{el,\Theta}} + \frac{1}{N_{pl,\Theta}} \tag{2}$$

which means that:

$$N_{RM,\Theta} = \frac{N_{el,\Theta} N_{pl,\Theta}}{N_{el,\Theta} + N_{pl,\Theta}} \tag{3}$$

– the fire resistance $N_{RM,\Theta}$ estimated in this way, and specified for a single transverse frame of a steel hall, is clearly associated with the previously set critical temperature $\Theta_{gr,pl}$, assuming that the purely plastic movement mechanism will condition frame failure,
– the proposed temperature provides a representative estimate of the fire resistance of the frame in question only when the following inequality is true:

$$\Theta_{gr,pl} \le \Theta_{gr,el} \tag{4}$$

in which $\Theta_{gr,el}$ means the reference temperature, which, when reached, results in the purely elastic lateral buckling of the entire frame or any of its elements (column or girt),
– if inequality (4) does not occur, then the critical temperature of the frame is $\Theta_{gr,el}$, for which the load-bearing capacity $N_{RM,\Theta}$ is calculated; however, in such a computational situation, the load-bearing capacity $N_{pl,\Theta}$ is the plastic load-bearing capacity of the cross-section of a representative element of the frame (column or girt) in pure bending (then $N_{pl,\Theta} = W_{pl} k_{y,\Theta} f_y$ – the value $k_{y,\Theta} f_y$ is the yield point of steel from which the frame element was made, reduced at temperature Θ, while W_{pl} is the deformation resistance index of a representative cross-section, independent of this temperature) with the possible inclusion of an interaction with a longitudinal and/or transverse force.

The critical temperature $\Theta_{gr,el}$, often corresponding to the purely elastic form of frame failure, is usually determined using the conventional procedures of the classic theory of elastic stability [12]. In the depiction proposed by us for the case, when lateral buckling determines frame failure, we assumed, as the limit of purely plastic resistance, the moment of the first plastic hinge becoming active, which is a kind of an approximation. Of course, by allowing further plastic hinges to appear, one to some extent assumes that the cross-sections holding these hinges will be able to rotate, and redistribute the bending moments.

zdolność do obrotu umożliwiająca redystrybucję momentów zginających.

Opracowanie procedur obliczeniowych pozwalających na efektywne wyznaczenie nośności $N_{pl,\Theta}$, a w konsekwencji skojarzonej z tą nośnością temperatury $\Theta_{gr,pl}$ dla ram o różnym przeznaczeniu i schemacie statycznym jest celem pracy doktorskiej drugiego z autorów niniejszej pracy.

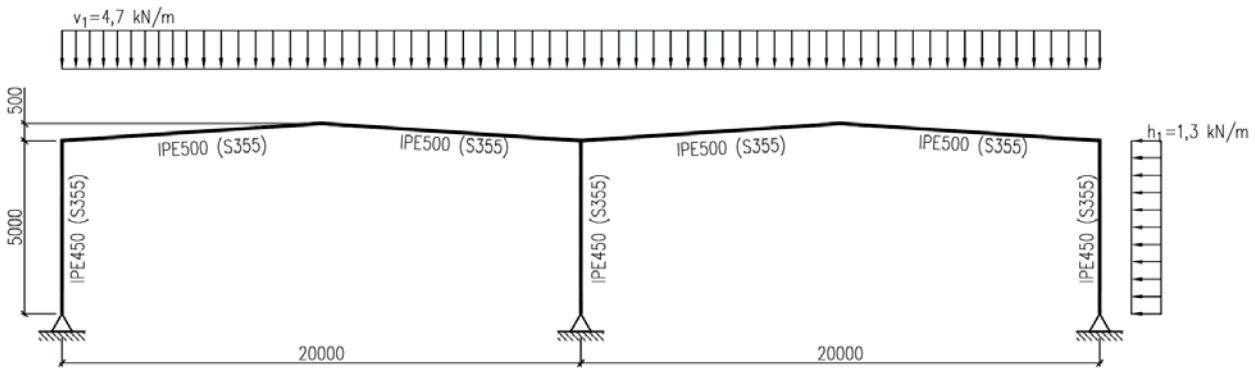
Developing computational procedures to make it possible to effectively determine the load-bearing capacity $N_{pl,\Theta}$, and, as a consequence, the temperature $\Theta_{gr,pl}$ associated with this capacity, for frames with various intended use and loading schemas, is the objective of the doctoral dissertation of the second author of this work.

Przykładowa weryfikacja przydatności modelu obliczeniowego pojedynczej ramy poprzecznej do szacowania odporności ogniowej hali stalowej

Pora powrócić do zasadniczego pytania stanowiącego kanwę niniejszych rozważań: czy oszacowanie temperatury krytycznej pojedynczej ramy poprzecznej hali stalowej może w ogóle stanowić podstawę do wiarygodnego wnioskowania o odporności ogniowej całego ustroju nośnego tej hali. Aby na nie w sposób miarodajny odpowiedzieć, trzeba najpierw ocenić, czy opisane i komentowane powyżej różnego typu uproszczenia zastosowane w proponowanym przez nas modelu formalnym prowadzą do znaczących rozbieżności w stosunku do bardziej ogólnego, klasycznego modelu numerycznego bazującego na trójwymiarowej analizie zachowania się badanej konstrukcji w pożarze. Do tego typu oceny wykorzystamy dane pochodzące z opublikowanego ostatnio raportu [13], a także z pracy [14], po ich odpowiednim przegrupowaniu i uporządkowaniu. Spośród wielu dostępnych wyników wybieramy te, które dotyczą typowej hali dwunawowej o schemacie statycznym pojedynczej ramy poprzecznej i układzie obciążeń zewnętrznych pokazanym na ryc. 1. Jak widać, wszystkie elementy tej ramy wykonano ze stali S355. Przyjęto, że w rozpatrywanej hali mamy do czynienia z rozgorzeniem pożaru ograniczonego jedynie do jej lewej nawy. Oznacza to równomierne i monotonicznie narastające ogrzewanie wskutek bezpośredniej ekspozycji ogniowej lewego słupa oraz załamanego w kalenicy lewego rygla tej nawy. Analogiczne elementy nośne zlokalizowane w prawej nawie, a także centralny słup pomiędzy nawami w czasie pożaru pozostają zimne. Taki scenariusz pożarowy można skojarzyć chociażby z istnieniem wewnątrz hali nieskończenie efektywnego oddzielenia przeciwogniowego mieszczącego w sobie i doskonale izolującego centralny rząd słupów.

An example of the verification of the usability of the computational model for a single transverse frame for the estimation of the fire resistance of a steel hall

We should return here to the fundamental question which constitutes the basis for these deliberations: can the estimation of the critical temperature of a single transverse frame of a steel hall constitute a basis for reliable conclusion-drawing in respect of the fire resistance of the entire load-bearing structure of the hall. To reliably answer this question, one has to first determine whether the various simplifications described and commented on above, used in the proposed formal model, lead to significant discrepancies when compared to a more general, classic numerical model, based on a three-dimensional analysis of the performance of the analysed structure in fire conditions. For this assessment we used data from a recently published report [13] and work [14], after their suitable regrouping and arrangement. From among the many available results, we chose those which involve a typical two-bay hall with a loading diagram of a single transverse frame and the external loads marked in Fig. 1. As indicated, all elements of the frame were made of S355 steel. It was assumed that in the hall in question we are dealing with a flashover limited only to the left bay. This means an equally and monotonically rising temperature, as a result of direct exposure to fire of the left column and the left girt of the bay, collapsed in a ridge. The analogous structural components located in the right bay, as well as the central column between the bays, remain cold during the fire. Such a fire scenario can be associated with the presence in the hall of an infinitely effective fire division, which holds and perfectly insulates the central row of columns.



Rycina 1. Pojedyncza rama poprzeczna rozpatrywanej w pracy hali stalowej (na podstawie prac [13] i [14])

Figure 1. The single transverse frame of the steel hall assessed in this paper (on the basis of papers [13] and [14])

ISSN 1895-8443

Do szczegółowej analizy wybrano cztery podstawowe modele obliczeniowe oznaczone kolejnymi literami arabskimi, odpowiednio A, B, C i D. Pokazano je schematycznie na ryc. 2. Elementy ogrzewane w czasie pożaru zostały przy tym odpowiednio pogrubione (brak pogrubienia oznacza, że element przez cały czas pożaru pozostaje zimny). Modele te różnią się przede wszystkim stopniem złożoności, w tym w szczególności:

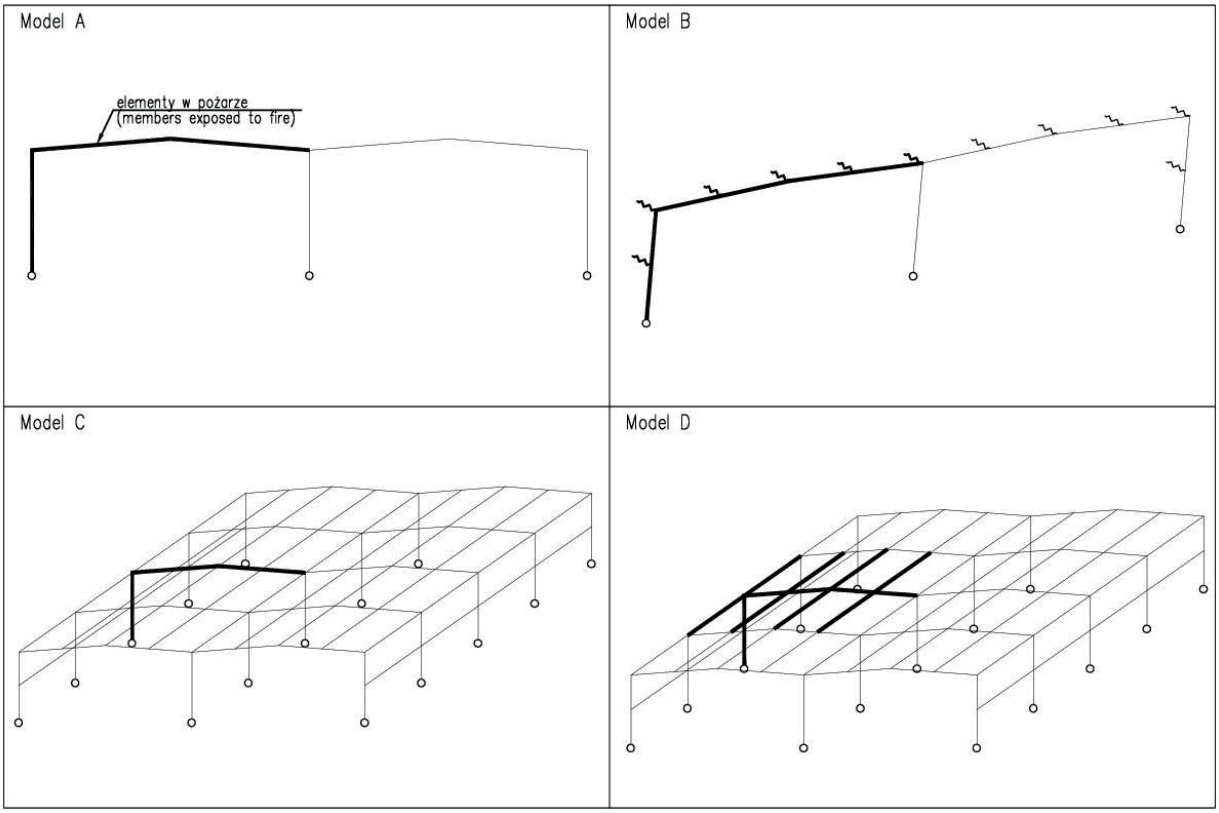
- **Model A** – jest modelem w pełni dwuwymiarowym, odpowiada pojedynczej ramie poprzecznej wyizolowanej z całej hali, w pożarze równomiernie ogrzewane są przy tym jedynie lewy słup i załamany w kalenicy rygiel lewej nawy,
- **Model B** – jest modelem pojedynczej ramy poprzecznej, analogicznym do modelu A, dodatkowo uwzględniono w nim jednak oddziaływanie ogrzewanych w pożarze płatwi dachowych, oddziaływanie to zamodelowano przez układ sprężyn skierowanych prostopadle do płaszczyzny ramy, w przypadku płatwi zlokalizowanych w lewej nawie sztywność tych sprężyn maleje ze wzrostem temperatury odpowiadających im płatwi,
- **Model C** – jest modelem trójwymiarowym obejmującym cały ustrój nośny hali, jedna z ram poprzecznych (pogrubiona na ryc. 2) została w lewej nawie poddana bezpośredniej ekspozycji ogniowej, w modelu w sposób naturalny uwzględnia się wpływ oddziaływania płatwi, nie uwzględnia się jednak nagrzewania płatwi w pożarze, wszystkie płatwie pozostają zimne przez cały czas jego trwania,
- **Model D** – jest modelem trójwymiarowym analogicznym do modelu C, przyjęto jednak, że wraz z nagrzewaniem się elementów nośnych zlokalizowanych w lewej nawie ogrzewanej ramy poprzecznej w sąsiadujących z tą ramą „polach" nagrzewają się również płatwie dachowe (na rycinie odpowiednio pogrubione).

Do porównania wyników uzyskanych na podstawie analizy wyspecyfikowanych powyżej modeli obliczeniowych posłużą przemieszczenia wybranych węzłów pokazanych na ryc. 3, w tym kolejno przemieszczenia poziome węzłów „a" i „c" oraz przemieszczenia pionowe węzła „b". Zaznaczmy przy tym, że podstawowym celem szczegółowych analiz prowadzonych w pracach [13] i [14] było porównywanie odpowiadających sobie przemieszczeń węzłów otrzymanych po zastosowaniu „bliźniaczych" programów komputerowych, odpowiednio specjalistycznego oprogramowania „SAFIR" oraz powszechnie znanych programów „ANSYS" i „ABAQUS". W ujęciu prezentowanym przez nas w niniejszej pracy do porównania wybraliśmy jedynie rezultaty otrzymane dzięki wykorzystaniu programu „ANSYS". Chodzi nam bowiem głównie o walidację samego modelu obliczeniowego, nie zaś o interpretację różnic wynikających z zastosowania wybranego przez eksperta narzędzia informatycznego.

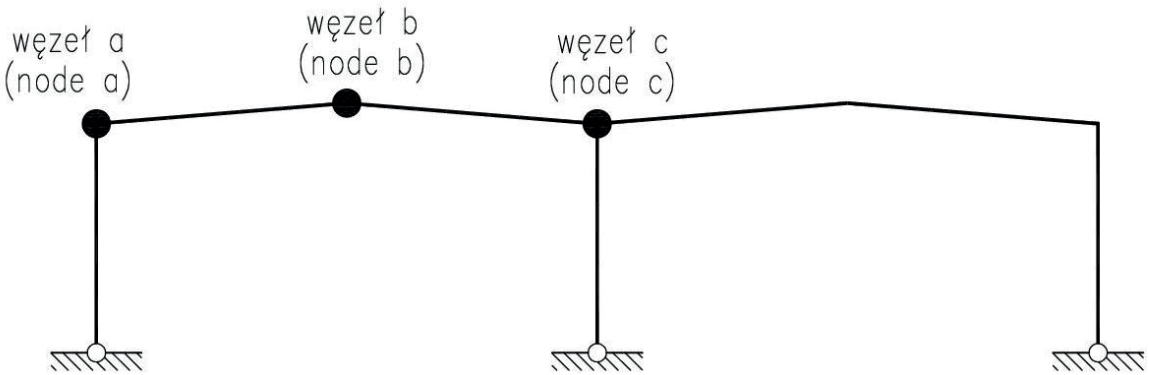
Four basic computational models, marked with consecutive letters of the Latin alphabet, A, B, C and D were selected for analysis. These are presented schematically in Fig. 2. The elements heated during the fire were suitably thickened (no thickening means that the element remains cold). The models differ from one another in their degree of complexity, including in particular:

- **Model A** – is a fully two-dimensional model, and corresponds to a single transverse frame isolated from the entire hall, during a fire; only the left column and left girt of the bay, collapsed in a ridge, are heated,
- **Model B** – is a model of a single transverse frame, analogous to model A, which, in addition, takes into account the impact of roof purlins heated in the fire. This impact was modelled by a set of springs directed perpendicularly to the frame plane; in the case of the purlins located in the left bay, the stiffness of the springs becomes lower as the temperature of the corresponding purlins becomes higher,
- **Model C** – is a three-dimensional model encompassing the entire load-bearing structure of the hall; one of the transverse frames (thickened in Fig. 2) was subjected to direct fire exposure in the left bay, and the model naturally takes into account the effect of purlin impact; however the heating of the purlins during the fire is not considered, and all purlins remain cold throughout the duration of the fire,
- **Model D** – is a three-dimensional model analogous to model C, in which it was, however, assumed that as the structural elements in the left bay of the heated transverse frame become hotter, roof purlins in "areas" adjacent to the frame also become hotter (suitably thickened in the Figure).

To compare the results obtained in the analysis of the above-specified computational models, the displacements of the selected nodes will be used, as indicated in Fig. 3, including, in order, the horizontal displacements of nodes "a" and "c", and the vertical displacements of node "b". Here we should highlight that the basic objective of the detailed analyses carried out in [13] and [14] was to compare the corresponding displacements of nodes, obtained following the application of "twin" computer programs, the specialist SAFIR software and the commonly known ANSYS and ABAQUS programs. In the depiction presented in this paper, we selected for comparison only the results obtained using the ANSYS program. We intend here mainly to validate the computational model, and not to interpret the differences resulting from the use of a given IT tool, selected by an expert.



Rycina 2. Rozpatrywane w pracy modele obliczeniowe hali stalowej poddanej wpływom oddziaływania pożaru (na podstawie prac [13] i [14])
Figure 2. Computational models of a steel hall exposed to a fire, assessed in this paper (on the basis of papers [13] and [14])



Rycina 3. Węzły ramy poprzecznej wybrane do szczegółowej analizy przemieszczeń w warunkach pożaru (na podstawie prac [13] i [14])
Figure 3. The frame nodes selected for the detailed analysis of the displacements under fire conditions (on the basis of papers [13] and [14])

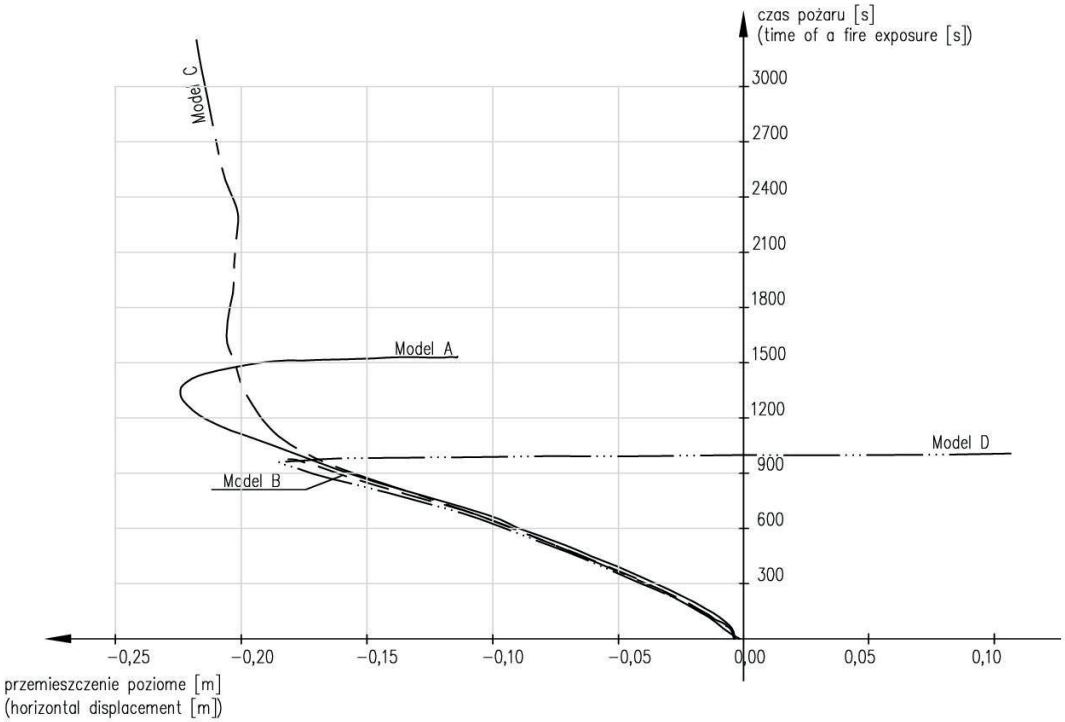
Analizę wyników uzyskanych po zastosowaniu opisanych powyżej modeli obliczeniowych rozpoczniemy od porównania przemieszczeń poziomych zidentyfikowanych w węźle „a". Pokazano je szczegółowo na ryc. 4. Wszystkie modele wykazują, co zresztą nie jest niespodzianką, że wraz z rozwojem pożaru następuje termiczne wydłużanie się rygla ramy skutkujące jego „rozpychaniem się" pomiędzy słupami. Powoduje to przemieszczenie węzła „a" w lewo. Zauważmy, że biorąc pod uwagę pierwsze 15 minut pożaru, co jest równoważne 900 sekundom jego trwania zaznaczonym na osi pionowej prezentowanego wykresu, nie ma znaczących różnic ilościowych w odniesieniu do przemieszczeń otrzymanych z poszczególnych modeli obliczeniowych.

We should start the analysis of the results obtained using the aforementioned computational models from a comparison of the horizontal displacements identified in node "a". These are presented in detail in Fig. 4. All models indicate, which is no surprise, that as the fire develops, the frame girt elongates, which results in its "jostling" between columns. This results in node "a" being displaced to the left. It is worth noting that for the initial 15 minutes of the fire, which equals 900 seconds marked on the vertical axis of the presented chart, there are no significant quantitative differences in relation to the displacements in individual computational models. The flexural rigidity of the girt and the yield point of the steel of which it was made are at this

 ISSN 1895-8443

Sztywność giętna rygla i granica plastyczności stali, z której go wykonano, są bowiem na tym etapie pożaru jeszcze na tyle duże, że nie obserwuje się gwałtownego przyrostu ugięcia. Analizując wyizolowaną z całej hali pojedynczą ramę poprzeczną (model A), obserwujemy jednak, że mniej więcej po 1400 sekundach nagrzewania w pożarze ugięcia rygla są już na tyle duże, że indukują ściąganie węzła „a" z powrotem do wewnątrz ramy, a siła rozciągająca w ryglu coraz bardziej efektywnie niweluje dominującą dotąd siłę ściskającą. Takiego wniosku nie da się zaobserwować po analizie zachowania się w pożarze ramy modelowanej przy pomocy modelu B. Płatwie wykonane z elementów o przekrojach o znacznej smukłości już po 900 sekundach pożaru uległy bowiem całkowitej degradacji, a więc sztywność modelujących ich wpływ nagrzewanych sprężyn zmalała do zera. Na dalszym etapie pożaru rama poprzeczna w jej części nagrzewanej nie jest już zatem stabilizowana przez płatwie. W pewnym przybliżeniu można twierdzić, że zachowanie się takiej ramy opisuje teraz model A. W modelu C płatwie przez cały czas pożaru pozostają zimne. Stawiają zatem skuteczny opór narastaniu ugięcia rygla, a przez to nie dochodzi do generowanego przez to ugięcie ściągania węzła „a" do wewnątrz ramy. Jeżeli jednak uwzględnimy równoczesne z ryglem nagrzewanie się płatwi z nim sąsiadujących (model D), to podobnie jak w modelu B płatwie te ulegną destrukcji już po 900 sekundach pożaru i nie będą przeciwstawiały się gwałtownemu narastaniu ugięcia rygla skutkującemu prawie natychmiastowym cofnięciem się węzła „a". Zauważmy, że obwisające płatwie dachowe wyraźnie przyczyniają się tu do zwiększania prędkości przyrostu ugięcia rygla, co jest równoznaczne ze znacznie szybszym cofaniem się węzła „a" do wewnątrz ramy w stosunku do analogicznego efektu obserwowanego w modelu A.

point of the fire high enough that no sudden increase in flexure is observed. Analysing a single transverse frame isolated from the entire hall (model A), we can observe that more or less after 1400 seconds of heating in a fire, the girt flexure is great enough that it induces the pulling of node "a" back inside the frame, and the tensile force in the node more and more effectively levels out the previously dominating compression force. No such conclusion can be made when analysing the behaviour of a frame modelled on model B. Purlins made of elements with highly slender cross-sections, as early as after 900 seconds of the fire deteriorated completely, and thus the rigidity of the heated springs which modelled their impact was reduced to zero. At a further stage of the fire, the transverse frame in its heated section is no longer stabilised by purlins. It can be approximately stated that the behaviour of such a frame is described in model A. In model C the purlins remain cold throughout the entire duration of the fire. They therefore successfully resist the increasing flexure of the girt, which prevents the pull generated by the flexure, of girt "a" inside the frame. If we were, however, to take into account the simultaneous heating of the girt and the adjacent purlins (model D), then, similarly to model B, the purlins would be destroyed as early as after 900 seconds of the fire, and will not resist the sudden increase in girt flexure, resulting in the almost immediate retraction of node "a". It is worth noting that the sagging purlins explicitly contribute to an increase in the speed of girt flexure, which equates to a much faster retraction of node "a" inside the frame when compared to the analogous effect observed in model A.

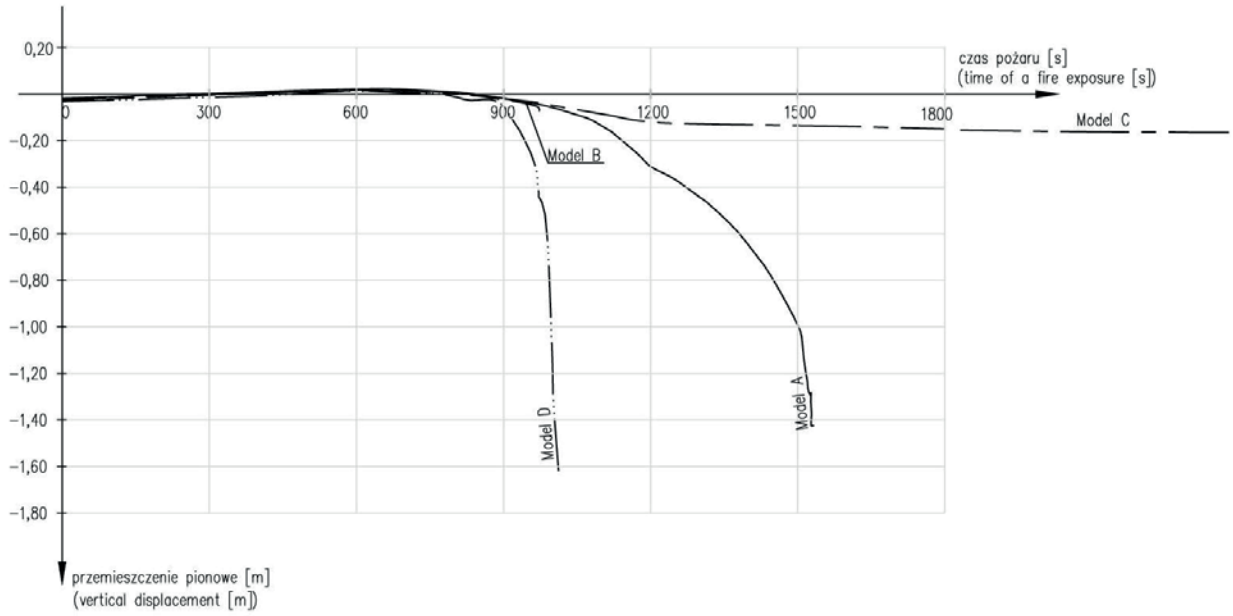


Rycina 4. Przemieszczenia poziome węzła „a" z ryc. 3 uzyskane po wykorzystaniu opisanych w tekście modeli obliczeniowych (opracowanie własne na podstawie danych z prac [13] i [14])

Figure 4. The horizontal displacements of node "a" shown in Fig. 3 obtained due to the application of all the computational models described in this paper (own elaboration based on the data taken from papers [13] and [14])

Jakościowo podobne wnioski można wyciągnąć z obserwacji przemieszczeń pionowych zinwentaryzowanych w węźle „b" w kalenicy rygla lewej nawy (ryc. 5). Tutaj również po 900 sekundach trwania pożaru widzimy wyraźny przyrost ugięcia rygla. W modelu D jest on jednak znacznie bardziej gwałtowny niż w modelu A. To, podobnie jak to pokazano na ryc. 4, destrukcyjny wpływ obwisających płatwi dodatkowo ściągających kalenicę w dół. Model B w tym momencie pożaru niejako „przepina się" na model A. Za to zimne płatwie z modelu C skutecznie przeciwstawiają się narastaniu ugięcia, a zatem i ściąganiu węzłów okapowych do wewnątrz ramy.

In qualitative terms, similar conclusions can be drawn from observing the vertical displacements located in node "b" in the ridge of the left bay girt (Fig. 5). Also in this case, after 900 seconds of fire we can observe a significant increase in girt flexure. In model D it is, however, much more violent than in model A. This, similarly to the example in Fig. 4, is the destructive impact of sagged purlins, which further pull the ridge down. Model B at this moment somewhat "becomes" model A, while the cold purlins in model C successfully resist the growing flexure, and therefore the pulling of eaves joints inside the frame.



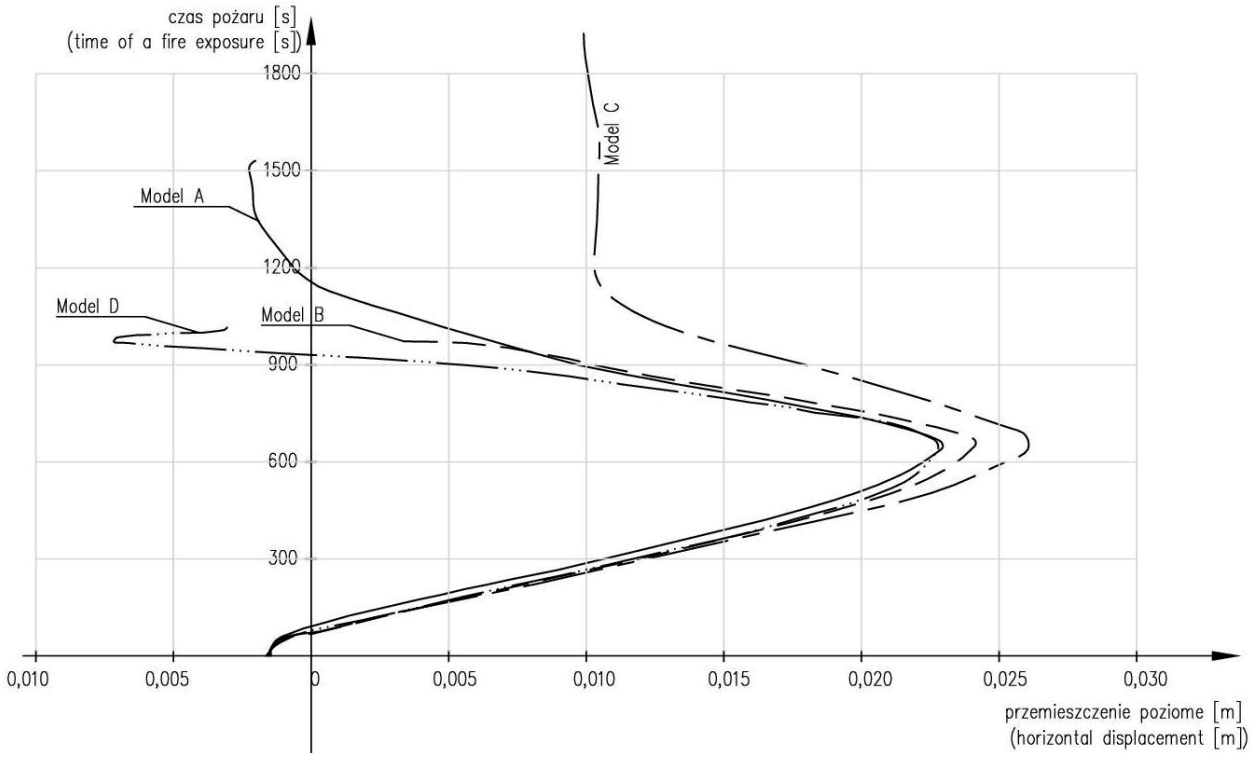
Rycina 5. Przemieszczenia pionowe węzła „b" z ryc. 3 uzyskane po wykorzystaniu opisanych w tekście modeli obliczeniowych (opracowanie własne na podstawie danych z prac [13] i [14])

Figure 5. The vertical displacements of node "b" shown in Fig. 3 obtained due to the application of all the computational models described in this paper (own elaboration based on the data taken from papers [13] and [14])

Na koniec porównamy przemieszczenia węzła „c" zestawione na ryc. 6. W pierwszym etapie trwania pożaru ugięcia rygla są jeszcze małe, a jego sztywność na tyle duża, że dominuje rozpychanie węzłów okapowych na skutek rozszerzalności termicznej. Węzeł „c" przemieszcza się zatem w prawo i nie ma znaczących różnic pomiędzy wartościami tego przemieszczenia uzyskanymi po zastosowaniu kolejnych modeli obliczeniowych. Już jednak po mniej więcej 10 minutach pożaru (600 sekundach) wskutek szybkiego narastania ugięcia rygla coraz większą rolę zaczyna odgrywać indukująca się w nim siła rozciągająca coraz bardziej efektywnie niwelująca wpływ siły ściskającej. Nie ma też dużych różnic pomiędzy wynikami ilościowymi uzyskanymi z modeli A, B i D. W węźle „c" duży wpływ na zachowanie ramy mają bowiem płatwie z prawej nawy, a te w modelach B i D przez cały czas pożaru pozostają zimne. Cofanie się węzła „c" w modelu D jest nadal nieco szybsze niż w modelu A. Różnica jest skutkiem ściągającego wpływu gorących i zwisających płatwi z lewej nawy. Znowu wyróżnia się model C. Zimne płatwie w obu nawach ramy nie pozwalają na szybkie narastanie ugięcia rygla.

At the end we should compare the displacements of node "c" presented in Fig. 6. In the first stage of fire, the flexure in the girt is still small, and its rigidity high enough to prevail over the jostling of eaves joints resulting from thermal expansion. Node "c" therefore moves to the right, and there are no significant differences between the values of this displacement after employing various computational models. However, only after more or less 10 minutes of fire (600 seconds), due to a quick increase in girt flexure, an increasingly large role is being played by the tensile force which is being induced within, which more and more effectively levels out the impact of the compression force. There are also no significant differences between the quantitative results from models A, B and D. In node "c" the purlins from the right bay considerably influence the behaviour of the frame, and those purlins in model B and C remain cold throughout the duration of the fire. The retraction of node "c" in model D is still somewhat faster than in model A. The difference results from the pulling effect of hot and sagging purlins in the left bay. Again, model C stands out. The cold purlins in both bays of the frame do allow the quick increase in girt flexure.

ISSN 1895-8443



Rycina 6. Przemieszczenia poziome węzła „c" z ryc. 3 uzyskane po wykorzystaniu opisanych w tekście modeli obliczeniowych (opracowanie własne na podstawie danych z prac [13] i [14])

Figure 6. The horizontal displacements of node "c" shown in Fig. 3 obtained following the application of all the computational models described in this paper (own elaboration based on the data taken from papers [13] and [14])

Uwagi końcowe

W opinii autorów z przedstawionych powyżej rozważań można wyciągnąć wniosek, że szacowanie odporności ogniowej hali stalowej na podstawie szczegółowej analizy wyizolowanej z tej hali pojedynczej ramy poprzecznej może dawać w miarę wiarygodne wyniki zwłaszcza wtedy, gdy o nośności tej ramy decyduje pierwsza faza pożaru. Jest to bowiem faza, w której redukcja sztywności giętnej elementów nośnych oraz wynikające z tej redukcji ich sprężysto-plastyczne deformacje są jeszcze na tyle małe, że można zaniedbać wpływ indukującej się w ryglu siły rozciągającej. Na tym etapie ekspozycji ogniowej wyniki otrzymane na podstawie prostego modelu dwuwymiarowego nie różnią się znaczącą od tych, które otrzymano by przy zastosowaniu bardziej złożonych modeli trójwymiarowych. Jeżeli jednak ustrój nośny analizowanej hali stalowej zapewnia bezpieczne przenoszenie przyłożonych do niego obciążeń także w dalszej fazie pożaru kojarzonej z dużymi przemieszczeniami elementów znacznie już osłabionych przez wpływ wysokiej temperatury, to postawiony wcześniej wniosek trzeba interpretować ostrożniej. W takim przypadku analiza jedynie pojedynczej ramy poprzecznej nie daje możliwości uwzględnienia wpływu nagrzanych płatwi dachowych, które niebezpiecznie przyspieszają narastanie ugięć rygla rozpatrywanej ramy. Wpływ ten jest efektem obserwowanego w gorących płatwiach tak zwanego efektu cięgna, to znaczy dominacji w nich

Concluding remarks

According to the authors, from the deliberations above one can draw the conclusion that the estimation of the fire resistance of a steel hall based on a detailed analysis of a single transverse frame isolated from the hall can yield somewhat reliable results, especially when the load-bearing capacity of the frame is conditioned by the first phase of the fire. This is the phase in which the decrease in the flexural rigidity of the structural elements and the resulting elasto-plastic deformations are so small that the impact of the tensile force inducting in the girt can be disregarded. In this stage of fire exposure the results obtained on the basis of a simple two-dimensional model are not significantly different from those yielded by the use of more advanced three-dimensional models. However, if the load-bearing structure of the analysed steel frame facilitates the safe transfer of loads, also in further stages of the fire, associated with substantial displacements of elements seriously weakened by high temperatures, then the proposal suggested above should be interpreted with more caution. In such a case, analysing only a single transverse frame does not provide the possibility of taking into account the hot roof purlins, which dangerously accelerate the increase in the girt flexure of the analysed frame. This impact results from the so-called catenary effect in hot purlins. The effect entails the predomination of the axial tensile force within, which completely levels the axial

osiowej siły rozciągającej całkowicie niwelującej występujące wcześniej osiowe ściskanie będące skutkiem rozszerzalności termicznej stali konstrukcyjnej. Odporność ogniowa hali stalowej oparta na analizie pojedynczej ramy poprzecznej będzie zatem teraz oszacowana nazbyt optymistycznie. Trzeba jednak wyraźnie podkreślić, że tego typu wynik będzie i tak znacznie bardziej wiarygodny od analogicznego rezultatu uzyskanego z modelu trójwymiarowego, w którym nie uwzględniono równoczesnego z nagrzaniem ram poprzecznych hali osłabienia sąsiadujących z nimi płatwi dachowych. Stąd wniosek, że uwzględnienie w trójwymiarowym modelu formalnym oddziaływania pożaru nie tylko na podstawowy ustrój nośny, ale również na płatwie dachowe i cały układ stężający halę, stanowi warunek sine qua non wiarygodności tego modelu, determinujący poprawność uzyskanych wyników.

Jeżeli akceptujemy do analizy posłużenie się prostym dwuwymiarowym modelem pojedynczej hali stalowej w miejsce bardziej złożonego modelu trójwymiarowego, to możemy określić poszukiwaną odporność, wyrażając ją poprzez wyspecyfikowaną dla tej ramy temperaturę krytyczną, nie zaś przez czas, przez który rama ta będzie zdolna w warunkach pożaru bezpiecznie przenosić przyłożone do niej obciążenia. Tego typu specyfikacja jest wygodna dla dalszego wnioskowania o bezpieczeństwie pożarowym. Uzyskana wartość odporności jest bowiem przypisana do konkretnej konstrukcji i nie zmienia się przy zmianie wybranego do rozważań scenariusza pożarowego. Oczywiście zmieniając pożar odniesienia, zmieniamy również czas, po którym ustalona wcześniej temperatura krytyczna badanej ramy zostanie osiągnięta.

W prezentowanych rozważaniach proponujemy powiązanie praktycznej procedury wyznaczania temperatury krytycznej ramy poprzecznej hali stalowej z konkretnymi potencjalnie możliwymi postaciami jej zniszczenia. Jest to zatem ujęcie alternatywne względem konwencjonalnych procedur normowych formalnie rozdzielających specyfikację odporności ogniowej na tę, która dotyczy rygli, i tę odniesioną do słupów badanej hali. Miarodajna odporność jest interakcją odporności wyznaczonych przy założeniu czysto sprężystego i czysto plastycznego zniszczenia w pożarze. Nie jest zatem prostym minimum obu tych odporności. Mamy nadzieję, że zaproponowane przez nas podejście okaże się przydatne w praktyce inżynierskiej, a uzyskane rezultaty pozwolą na bardziej wiarygodną ocenę poszukiwanej odporności.

compression resulting from the thermal expansion of structural steel. The fire resistance of a steel hall based on an analysis of a single transverse frame will therefore be overestimated. It should be, however, clearly underlined that such a result will still be much more reliable than the analogous result of a three-dimensional model which does not take into account the simultaneous heating of the transverse frames of the hall and of the adjacent roof purlins. Therefore one can conclude that taking into account, in the three-dimensional formal model, the impact of the fire, not only on the basic load-bearing structure, but also on the roof purlins and the entire anti-sag system of the hall, is the *sine qua non* condition of the model's credibility, determining the correctness of the obtained results.

If we accept for analysis the use of a simpler two-dimensional model of a single steel hall, as opposed to a more complex three-dimensional model, then we can determine the sought resistance by expressing it by the critical temperature specified for the frame, and not by time for which the frame will be able to safely transfer loads under fire conditions. Such a specification is convenient for further reasoning on fire safety. This is because the obtained resistance value is ascribed to a specific structure, and does not change when the analysed fire scenario changes. Of course, by changing the reference fire, we also change the time after which the previously set critical temperature of the frame is reached.

In the presented deliberations we propose to associate the practical procedure for determining the critical temperature of a transverse frame of a steel hall with the specific, potential, forms of its failure. This is, therefore, an approach alternative to conventional, standard procedures, which formally separate the fire resistance specification into the one pertaining to girts, and the one referring to columns in a given hall. A representative resistance is the interaction between the resistances set when assuming purely elastic and purely plastic failure in a fire. Therefore, it is not the simple minimum of both these resistances. We hope that the proposed approach will prove useful in engineering practice, and the obtained results will allow a more reliable evaluation of resistance.

Literatura/Literature

[1] Błyskal E., Ślęczka L., *Przestrzenne modele obliczeniowe ramowych hal stalowych*, „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury", 2015, 32(62), (3/II/15), 25–36.

[2] Rankine W.J.M., *Useful rules and tables*, McGraw-Hill, London 1866.

[3] Murzewski J., *Teoria nośności losowej konstrukcji prętowych*, PWN, Warszawa 1976.

[4] Maquoi R., Jaspart J.-P., *Merchant-Rankine approach for the design of steel and composite sway building frames*, "Steel Structures", 2002, 2, 1, 1–11.

[5] Skowroński W., *Plastic load capacity and stability of frames in fire*, "Engineering Structures", 1997, 19, 9, 764–771.

[6] Toh W.S., Tan K.H., Fung T.C., *Strength and stability of steel frames in fire: Rankine approach*, "Journal of Structural engineering", 2001, 127, 4, 461–469.

[7] Maślak M., *Rankine-Merchant approach to specification of flexural buckling coefficient for fire situation*, [in:] *Progress in steel and composite structures, Proceedings of the 12th International Conference on Metal Structures*, Gosowski B., Rykaluk K., Ziółko J. (eds.), ICMS, Wrocław, June 15–17, 2011, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 172–180.

ISSN 1895-8443

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

[9] Maślak M., *Trwałość pożarowa stalowych konstrukcji prętowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008.

[10] Malendowski M., Glema A., *Development and implementation of coupling method for CFD-FEM analyses of steel structures in natural fire*, "Procedia Engineering" 2017, 172, 692–700.

[11] Maślak M., *Miarodajna gęstość obciążenia ogniowego strefy pożarowej – wartość nominalna z pojedynczej inwentaryzacji czy raczej statystycznie uzasadniona wartość charakterystyczna*, BiTP Vol. 44 Issue 4, 2016, pp. 121–129.

[12] Galambos T.V., *Guide to stability design criteria for metal structures*, John Wiley & Sons Inc., New York 1998 (fifth edition).

[13] Vassart O., Brasseur M., Cajot L. G., Obiala R., Griffin A., Spasov Y., Renaud C., Zhao B., Arce C., de la Quintana J., *Fire safety of industrial halls and low-rise buildings: realistic fire design, active safety measures, post-local failure simulation and performance based requirements*, EUR 22568 EN Final Report, Luxembourg 2007.

[14] Obiala R., Vassart O., Zhao B., Sakj M. S., de la Quintana J., Morente F., Fransen J.-M., Lansival J.-B., *Fire safety of industrial halls. A valorization project*, EUR 24222 EN Final Report, Luxembourg 2010.

DR HAB. INŻ. MARIUSZ MAŚLAK, PROF. PK – profesor nadzwyczajny w Katedrze Konstrukcji Metalowych na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej. Zajmuje się kształtowaniem, utrzymaniem i weryfikacją stanu bezpieczeństwa różnego typu stalowych ustrojów nośnych ze szczególnym uwzględnieniem zachowania się tego typu konstrukcji w warunkach ekspozycji ogniowej. Członek International Association for Fire Safety Science (**IAFSS**). Z ramienia Polski członek Technical Committee 3 (**TC3**): "Fire Safety" przy European Convention for Constructional Steelwork (**ECCS**), a także członek Komitetu Technicznego **CEN TC 250/SC3:** „Evolution Group Eurocode 3, Part 1–2". W latach 2010–2014 członek Komitetu Zarządzającego Międzynarodowego Projektu Badawczego **COST TU0904** „Integrated Fire Engineering and Response". Od roku 2014 członek Komitetu Zarządzającego Międzynarodowego Projektu Badawczego **COST TU1402** „Quantifying the Value of Structural Health Monitoring". W latach 2010 – 2014 kierownik grantu badawczego własnego **N N506 243938** „Miary bezpieczeństwa i ich wzajemne relacje w wyjątkowej sytuacji projektowej pożaru rozwiniętego".

MGR INŻ. ANNA TKACZYK – uprawniony projektant budowlany. Absolwentka studiów doktoranckich prowadzonych w Politechnice Świętokrzyskiej. Prowadzi własne biuro budowlane Bauko S.C. Obecnie pracuje nad rozprawą doktorską „Nośność graniczna stalowych ustrojów ramowych w pożarze rozwiniętym – oszacowanie metoda kinematyczną".

MGR INŻ. PIOTR WOŹNICZKA – uprawniony projektant budowlany. Wykładowca w Katedrze Konstrukcji Metalowych na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej. Student studiów doktoranckich. Obecnie pracuje nad rozprawą doktorską „Strategie bezpieczeństwa pożarowego wybranych szkieletów stalowych hal wielkogabarytowych".

MARIUSZ MAŚLAK, D.Sc.Eng., CUT Prof. – Associate Professor at the Department of Metal Structures of the Faculty of Civil Engineering, the Cracow University of Technology. His focus areas are the development, maintenance and verification of the safety of various types of steel load-bearing structures, including in particular the behaviour of such structures when exposed to fire. A member of the International Association for Fire Safety Science (**IAFSS**). A member of the Technical Committee 3 (**TC3**): "Fire Safety" of the European Convention for Constructional Steelwork (**ECCS**) representing Poland, and also a member of the Technical Committee **CEN TC 250/SC3**: *"Evolution Group Eurocode 3, Part 1-2"*. Between 2010 and 2014 he was a member of the Management Committee of the International Research Project COST TU0904 "Integrated Fire Engineering and Response". A member of the Management Committee of the International Research Project COST TU1402 "Quantifying the Value of Structural Health Monitoring". A head of the project **N N506 243938** funded by the Polish Ministry of Science and Higher Education called "Measures for safety and their interrelations in the accidental design situation of a fully developed fire" (including between 2010 and 2014).

ANNA TKACZYK, M.Sc.Eng. – licensed construction designer. Graduated from a doctoral programme at the Kielce University of Technology. She runs her own construction studio Bauko S.C. Currently, she is working on her doctoral dissertation on "The plastic limit load of steel frame structures in a fully developed fire – a kinematic-method estimation".

PIOTR WOŹNICZKA, M.Sc.Eng. – licensed construction designer. A lecturer at the Department of Metal Structures of the Faculty of Civil Engineering, the Cracow University of Technology. A PhD student. He is currently working on a doctoral dissertation on "Fire safety strategies for selected frame structures of large-space steel halls".

Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Artykuł został przetłumaczony ze środków MNiSW w ramach zadania: Stworzenie anglojęzycznych wersji oryginalnych artykułów naukowych wydawanych w kwartalniku „BiTP. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza" – typ zadania: stworzenie anglojęzycznych wersji wydawanych publikacji finansowane w ramach umowy 935/P-DUN/2016 ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na działalność upowszechniającą naukę.