

st. kpt. dr inż. Tomasz Drzymała\*  
mł. kpt. inż. Mariusz Kaszyński\*\*

# Zapewnienie bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji na etapie projektowania

*Fire safety assurance of frame structures at the design stage*

**Streszczenie.** W niektórych sytuacjach konieczne może być określenie odporności ogniowej elementu konstrukcyjnego w sposób obliczeniowy. W artykule poddano analizie algorytm właściwy dla metody elementów skończonych i metody przemieszczeń przy obliczeniach ramy przestrzennej (dla sytuacji stałej oraz sytuacji wyjątkowej, jaką jest pożar), którą stanowić będzie sześciokondygnacyjny budynek biurowy o konstrukcji szkieletowej. Rama przedstawiona zostanie w dwóch wariantach różniących się między sobą połączeniami w węzłach między poszczególnymi prętami (schematem statycznym). Założono, że wariant I symulował będzie ramę, której wszystkie połączenia między prętami zrealizowane będą w sposób sztywny. W wariantcie II natomiast rama będzie miała szereg zwolnień w postaci przegubów pomiędzy poszczególnymi elementami ramy z zachowaniem niezbędnej geometrycznej niezmienności konstrukcji. Dla założonych wariantów, na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej, sformułowano wnioski końcowe.

**Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo pożarowe, konstrukcje inżynierskie, konstrukcje ramowe, symulacje komputerowe.

**Abstract.** In some situations it is necessary to determine fire resistance of structural element with calculation method. In this article an algorithm appropriate for the finite element method and compartments method in calculation of the time frame (for steady state and special case such as fire) is analysed, which is a six-storey office building with frame structure. The frame is presented in two options differing with connections in the nodes between the bars (static scheme). It was assumed that option I simulated the frame, where all connections between the bars were rigid. In option II it was assumed that the frame had a number of exemptions in the form of joints between frame elements with the necessary geometric invariance structure. For the above mentioned options, based on the conducted comparative analysis final conclusion were formulated.

**Keywords:** fire safety, engineering structures, frame structures, computer simulations.

**W** celu zachowania nośności konstrukcji podczas pożaru niezbędne jest przeprowadzenie wielu analiz i zastosowanie odpowiedniej wiedzy technicznej, która składa się na proces projektowania [1, 6, 7, 8, 9]. Na przestrzeni ostatnich kilkadziesiąt lat kilkakrotnie zmieniło się podejście do projektowania konstrukcji obiektów budowlanych. Obecnie w większości państw rozwiniętych, przy wymiarowaniu elementów konstrukcyjnych, obowiązuje metoda stanów granicznych. Stanowi ona podstawę projektowania obiektów budowlanych zgodnie z wytycznymi norm europejskich (Eurokodów).

Ze względu na ochronę przeciwpożarową, elementy konstrukcyjne budynku muszą być zaprojektowane lub zabezpieczone w sposób gwarantujący osiągnięcie przez nie odporności ogniowej wynikającej z klasy odporności pożarowej budynku. W przypadku standardowej ekspozycji pożarowej elementy powinny spełniać kryterium „R”, tj. związane z oceną nośności mechanicznej. Przyjmuje się, że kryterium „R” jest spełnione, gdy funkcja nośna jest utrzymana w wymaganym okresie ekspozycji pożarowej.

W przypadku konstrukcji wykonanych ze stali, betonu czy drewna metody obliczeniowego określenia odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych istnieją od dawna. Opis takich me-

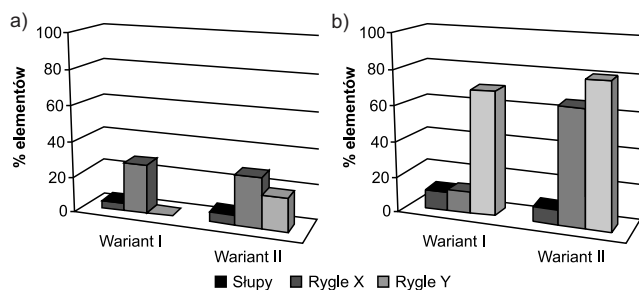
tod znaleźć można w literaturze technicznej, instrukcjach ITB, prasie fachowej oraz w normach, a przede wszystkim Eurokodach [2, 3, 4].

W standardowym podejściu do projektowania konstrukcji ramowych na sytuację pożarową często pomija się pracę konstrukcji jako całości i przyjmuje wyizolowany element ramy (słupy, rygle), obciążonej zestawem sił jak w przypadku sytuacji stałej. W niektórych przypadkach takie podejście może być niewystarczające. Niezależnie od obowiązujących norm i innych aktów prawnych, stosowanych w procesie wymiarowania elementów, zawsze konieczne jest wykonanie obliczeń statycznych konstrukcji. Nawet najlepiej napisana norma dotycząca wymiarowania elementów ze stali, betonu czy drewna nie jest w stanie zapewnić bezpieczeństwa konstrukcji, gdy nie zostaną uwzględnione wszystkie obciążenia oddziałujące na konstrukcję oraz sytuacje szczególne, które mogą wystąpić w trakcie eksploatacji budynku, np. ekspozycja konstrukcji na oddziaływanie wysokiej temperatury. **Wyznaczenie geometrii konstrukcji, zebranie obciążeń oddziałujących oraz przyjęcie odpowiedniego schematu statycznego stanowi początkowy etap projektowania.** Uwzględniając, na etapie zbierania obciążeń, wariant wystąpienia pożaru w budynku, możliwe jest ustalenie modelu konstrukcji, który znacznie ogranicza wielkość przyrostu sił wewnętrznych w poszczególnych elementach. Poszukiwanie takiego rozwiązania ze względu na bezpieczeństwo pożarowe nie jest standardem stosowanym w projektowaniu. Pomimo braku zapisów (w normach określających obciążenia oddziałujące na budynek) o ko-

\* Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego

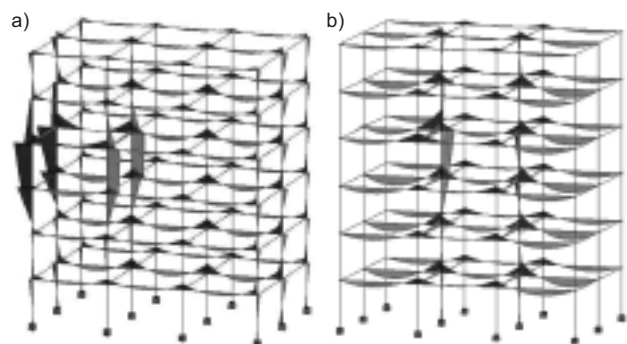
\*\* Komenda Miejska Państwowej Straży Pożarnej w Bydgoszczy





Rys. 3. Elementy spełniające w sytuacji stałej kryterium: a – maksimum; b – minimum [Źródło: opracowanie własne]

sytuacji wyjątkowej. Wykresy momentów zginających MY w przypadku obu wariantów analizowanej ramy przedstawiono na rysunku 4. W miejscu występowania oddziaływania termicznego wyraźnie widać „zaburzenia” w wykresach sił wewnętrznych. Na wykresie momentów zginających MY w sytuacji wyjątkowej dla ramy zamodelowanej jak w wariantcie I, zauważalny jest znaczny przyrost wartości momentów na wszystkich elementach narażonych na oddziaływanie sił wyjątkowych. W wariantcie I węzły wszystkich słupów i rygli zamodelowane są jako sztywne. W przypadku wariantu II ramy przestrzennej, przyrosty i zaburzenia koncentrują się jedynie w okolicach słupów środkowych. W wariantcie II węzły słupów środkowych i wszystkich rygli zamodelowane są jako sztywne, natomiast jako przegubowe zamodelowano węzły słupów zewnętrznych.



Rys. 4. Wykres momentów zginających MY w sytuacji wyjątkowej: a – wariant I; b – wariant II [Źródło: opracowanie własne]

## Podsumowanie i wnioski

Obliczanie układów przestrzennych pozwala na dokładniejszą analizę ustroju prętowego w porównaniu z analizą dwuwymiarową. Jest to możliwe dzięki uwzględnieniu współpracy elementów leżących w różnych płaszczyznach oraz ze względu na to, iż nie obowiązuje wiele uproszczeń, które stosowane są w metodach obliczeniowych stosowanych do płaskich układów prętowych (np. uwzględnienie oddziaływania sił podłużnych, skręcalności prętów itd.).

Zakres ochrony przeciwpożarowej uwzględniany jest zgodnie z odpowiednimi pozycjami przepisów normowych (np. w Eurokodach) dopiero na etapie wymiarowania konstrukcji, a nie obliczania sił wewnętrznych. W związku z tym, w „sytuacji pożarowej”, pomija się pracę konstrukcji jako całości i przyjmuje wyizolowany element ramy, obciążonej zestawem sił dla „sytuacji stałej”. Do w ten sposób opisanego elementu stosuje się zalecenia normowe dotyczące ochrony przeciwpożarowej. Wykonana symulacja potwierdza, że takie podejście może w pewnych przypadkach być

niewystarczające. Na ogół wariant II wykazuje wartości ekstremalnych sił wewnętrznych wyższe niż wariant I.

W sytuacji wyjątkowej, przy oddziaływaniu wysokiej temperatury, bardzo ważnym elementem jest odpowiedni schemat statyczny konstrukcji. Większość przekroczeń sił wewnętrznych (o 20% w stosunku do sytuacji stałej) wykazała konstrukcja z wariantu I. Wariant II w zdecydowanie mniejszym stopniu poddał się oddziaływaniu temperatury.

Analizując wariant I konstrukcji, można zauważyć bardzo duże przyrosty sił pomiędzy sytuacją stałą a wyjątkową we wszystkich elementach, na które oddziałuje temperatura. W związku z tym, w zależności od tego, w której części budynku sytuacja wyjątkowa powstanie, przyrosty sił będą analogiczne do zaprezentowanych w przykładzie.

W przypadku analizy konstrukcji zaprezentowanej w wariantcie II, przyrosty sił wykazały znaczne przewyższenia jedynie w słupie wewnętrznym budynku. Słup ten stanowi trzpień główny. Można spodziewać się, iż w przypadku powstania pożaru w innej części budynku, siły powstałe na skutek sytuacji wyjątkowej będą również koncentrowały się w okolicach słupów środkowych. Takie podejście umożliwia ukierunkowanie oddziaływania temperatury na konstrukcję na wybrane przez konstruktora elementy. Zabezpieczenie przeciwpożarowe budynku można w ten sposób skoncentrować w odpowiednich miejscach (strategicznych ze względu na nośność budynku). Pozostałe elementy mogą być zabezpieczone w sposób profilaktyczny. W związku z tym konstrukcja zaprezentowana w wariantcie II, ze względu na ochronę przeciwpożarową, jest znacznie bezpieczniejsza niż konstrukcja wg wariantu I.

Stosowanie zaawansowanych metod inżynierskich do obliczania ram przestrzennych pozwala na wariantową analizę rozpatrywanego układu. Możliwe jest dzięki temu dobranie takiego układu statycznego i poddanie go wymiarowaniu, aby oddziaływanie termiczne w sytuacji wyjątkowej przebiegało w sposób „spodziewany”.

## Literatura

- [1] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 z 9 marca 2011 r. ustanawiające zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i uchylające dyrektywę Rady 89/106/EWG w sprawie zbliżenia przepisów ustawowych, wykonawczych i administracyjnych państw członkowskich odnoszących się do wyrobów budowlanych, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 88/5.
- [2] PN-EN-1991-1-2 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcję. Część 1-2: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania w warunkach pożaru.
- [3] PN-EN-1992-1-2 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-2: Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.
- [4] PN-EN-1993-1-2 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-2: Reguły ogólne. Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe.
- [5] Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011. Podręcznik użytkownika. Autodesk, marzec 2010.
- [6] Szmelter J., Dacko M., Dobrociński S., Wieczorek M.: Metoda elementów skończonych w statyce konstrukcji, Arkady, Warszawa 1979.
- [7] Branicki C., Ciesielski R., Kacprzyk Z., Kawecki J., Kączkowski Z., Rakowski G.: Mechanika Budowli. Ujęcie komputerowe. Tom 1. Arkady, Warszawa 1991.
- [8] Majchrzak E., Mochacki B.: Metody numeryczne. Podstawy teoretyczne, aspekty praktyczne i algorytmy. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.
- [9] Rakowski G., Kacprzyk Z.: Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.