

Zastosowanie zaawansowanej metody oceny odporności ogniowej w budownictwie przemysłowym



dr inż.
PIOTR WOŹNICZKA
Politechnika Krakowska,
Wydział Inżynierii Lądowej
ORCID: 0000-0002-5471-9526

Artykuł przedstawia przykład opracowanej oceny odporności ogniowej hali maszynowni o konstrukcji stalowej. Zaprezentowano wyniki symulacji rozwoju pożaru oraz odpowiedzi mechanicznej konstrukcji. Obliczenia przeprowadzone za pomocą zaawansowanych programów komputerowych mogą stanowić podstawę do opracowania strategii bezpieczeństwa pożarowego danego obiektu.

Pożary w obiektach przemysłowych nie są zjawiskiem powszechnym. Statystyki straży pożarnej wskazują, że stanowią one zaledwie około 2% całkowitej liczby incydentów pożarowych, podczas gdy w przypadku obiektów mieszkalnych jedno- i wielorodzinnych analogiczna wartość wynosi 17% [1]. Należy jednak zauważyć, że pożary w budownictwie przemysłowym prowadzą często do poważnych konsekwencji ekonomicznych i społecznych. Za przykład może posłużyć spowodowany wyciekami oleju pożar turbiny w hali maszynowni jednej z krajowych elektrociepłowni [2]. W wyniku krótkiego, ale intensywnego pożaru doszło do zniszczenia ponad 900 m² dachu. Wspomniany incydent miał miejsce w okresie zimowym i stanowił poważne zagrożenie dla dostaw ciepła oraz energii dla mieszkańców dużej aglomeracji miejskiej.

Współcześnie dzięki dynamicznemu rozwojowi zaawansowanych metod oceny odporności ogniowej istnieje możliwość dokładniejszej analizy zachowania się tego typu kluczowych obiektów w warunkach pożaru. Opracowywane prognozy pozwalają na określenie modeli zniszczenia, przemieszczeń, a także na wyznaczenie wartości temperatury krytycznej dla kompletnego trójwymiarowego modelu konstrukcji poddanego oddziaływaniu nierównomiernego rozkładu wartości temperatury. Użyte dane mogą być cennym źródłem informacji dla osób zarządzających danym obiektem oraz dla straży pożarnej, zarówno przy prognozowaniu, jak i ocenie skutków już zaistniałych incydentów pożarowych. Niestety ze względu na znaczny stopień skomplikowania,

ograniczoną dostępność danych wejściowych oraz brak precyzyjnych wytycznych co do zakresu i sposobu prowadzenia symulacji liczba dostępnych kompletnych analiz tego typu jest ograniczona [3].

W tej sytuacji w artykule przedstawiono przykład kompletnej analizy typu *performance-based* opracowanej dla obiektu maszynowni elektrociepłowni. Szczególny nacisk położono na rozpoznanie wpływu wybranych czynników (sposób modelowania konstrukcji, nierównomierne ogrzewanie) na prognozowaną odporność ogniową ustroju nośnego hali.

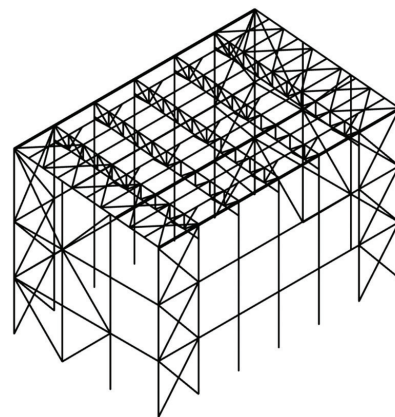
Zaawansowana analiza odporności ogniowej konstrukcji

Zaawansowana analiza odporności ogniowej ustroju nośnego każdorazowo składa się z dwóch etapów: symulacji rozwoju pożaru oraz analizy odpowiedzi mechanicznej konstrukcji. Do przeprowadzenia niezbędnych obliczeń konieczne jest wykorzystanie zaawansowanego oprogramowania komputerowego. W omawianym przypadku zastosowano odpowiednio programy Fire Dynamics Simulator [4] oraz Safir [5].

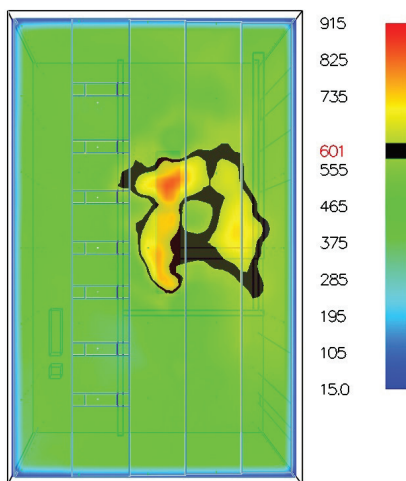
Rozpatrywany obiekt jest parterową halą o konstrukcji stalowej o wysokości 24 m i wymiarach w rzucie 21,6 m na 36 m. Schematyczny widok konstrukcji przedstawiono na rys. 1. Obudowę wykonano z płyt warstwowych z rdzeniem z wełny mineralnej. W obiekcie zaprojektowano siedem kłap oddymiających. W ścianie frontowej zlokalizowano bramy główne (4 x 4,5 m) oraz wejścia (1 x 2,1 m). We-

wnątrz hali znajdują się jedynie instalacje oraz niezbędne do ich obsługi pomosty stalowe. Turbina została umieszczona na niezależnej konstrukcji na poziomie około 13,5 m nad poziomem posadzki (8,5 m poniżej dachu hali).

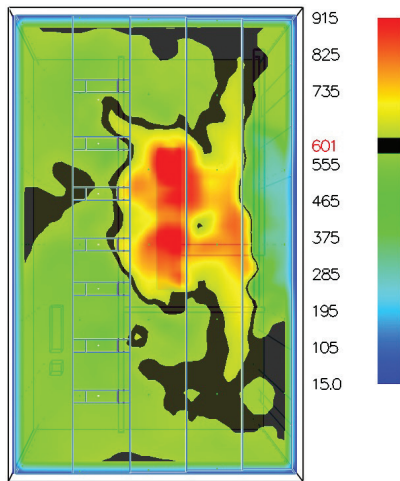
Rozpatrywano scenariusz pożaru zlokalizowanego, zakładając, że początkowe źródło ognia jest związane z wyciekami oleju z turbiny [6]. Na podstawie normy [7] prędkość rozwoju pożaru określono jako ultraszybka, natomiast całkowitą moc pożaru oszacowano na 70 MW. Dla spalającego oleju przyjęto ciepło właściwe 41 MJ/kg i gęstość 940 kg/m³. Wartość temperatury zapłonu oraz szybkości wydzielania ciepła (RHRf) dla pozostałych instalacji (w szczególności okablowania) wyniosły odpowiednio 350°C i 600 kW/m² [8]. W modelu obliczeniowym zastosowano sześciennie elementy skończone o długości boku równej



Rys. 1. Model konstrukcji hali maszynowni opracowany w programie Safir



Rys. 2. Rozkład wartości temperatury w przekroju poziomym na wysokości +22m: a) t=600 s b) t=900 s



Rys. 3. Rozkład wartości temperatury w przekroju poprzecznym: a) t=600 s b) t=900 s

0,5 m. W tej sytuacji wartość parametru D/δ^* była równa 10,5 przy wartościach zalecanych zawierających się w przedziale od 6 do 16 [4]. Rozkłady wartości temperatury bezpośrednio pod dachem hali oraz w przekroju poprzecznym przedstawiono odpowiednio na rys. 2. i 3. Na rys. 4. umieszczono z kolei, odnotowane na trzech różnych wysokościach, wykresy wartości temperatury uzyskane dla wybranego słupa.

W kolejnym kroku przeprowadzono analizę odpowiedzi mechanicznej konstrukcji. Wartość współczynnika redukcyjnego obciążeń η wynosiła 0,58. W modelach komputerowych zadano obciążenia stałe, obciążenie śniegiem i wiatrem, a także obciążenia od belki podsuwnicowej i suwnicy w stanie spoczynku. Sama belka podsuwnicowa została jednak w modelach konstrukcji pominięta. W celu uwzględnienia normowej klasyfikacji przekrojów elementom zaliczonym do klas 2, 3, 4 przypisano zaawansowany model materiału STEELSL [9]. Dla elementów klasy 1 przyjęto standardowy model materiału STEEL3EN [5]. Szywność skrętną płatwi obliczono dla wartości temperatury równej 500°C. Zastosowano trójwęzłowe elementy skończone prętowe o długości 20 cm. Analizę prowadzono jako dynamiczną, co miało na celu pominięcie lokalnych niestabilności niedeterminujących nośności całej konstrukcji. Minimalna wartość kroku czasu wyniosła 0,1 s, natomiast początkowy krok czasu 1 s.

Zestawienie wybranych spośród opracowanych modeli rozpatrywanej hali maszynowni przedstawiono w tab. 1. Poszczególne modele różniły się między sobą sposobem ogrzewania (krzywa standardowa ISO lub krzywe temperatura–czas uzyskane z symulacji komputerowych), uwzględnieniem bądź pominięciem lokalnych imperfekcji łukowych, a także sposobem modelowania ustroju nośnego (model trójwymiarowy, model wydzielonej ramy płaskiej). W obliczeniach uwzględniono także dwie możliwości podparcia ramy płaskiej

z płaszczyzny układu: za pomocą podpór nieprzesuwnych lub też za pomocą elementów typu sprężyna.

Omówienie uzyskanych rezultatów

Podstawowe rezultaty przeprowadzonych analiz zestawiono w tab. 2. Prognozowana odporność ogniowa była dla poszczególnych modeli zbliżona i zawierała się w przedziale od 811 s do 934 s. Najwyższe wartości odnotowano w przypadku stosunkowo prostych modeli wydzielonych ram płaskich, natomiast najniższe w przypadku kompletnych trójwymiarowych modeli konstrukcji. Wpływ imperfekcji oraz sposobu modelowania na ostateczny rezultat był niewielki. Oszacowana odporność

ogniowa nie była, w przeciwieństwie do modeli opisanych w [10], znacząco różna w przypadku ogrzewania według krzywej ISO oraz ogrzewania według scenariusza zakładającego pożar naturalny. W omawianym przypadku było to spowodowane niewielką odległością początkowego źródła ognia od konstrukcji dachu i dużą maksymalną mocą pożaru lokalnego ($Q=70$ MW). Dla porównania: odpowiednia zalecana wartość w przypadku hal magazynowych wynosi 25 MW [10]. Wyznaczone wartości temperatury krytycznej również były do siebie zbliżone i wahały się w przedziale od 650°C do 705°C.

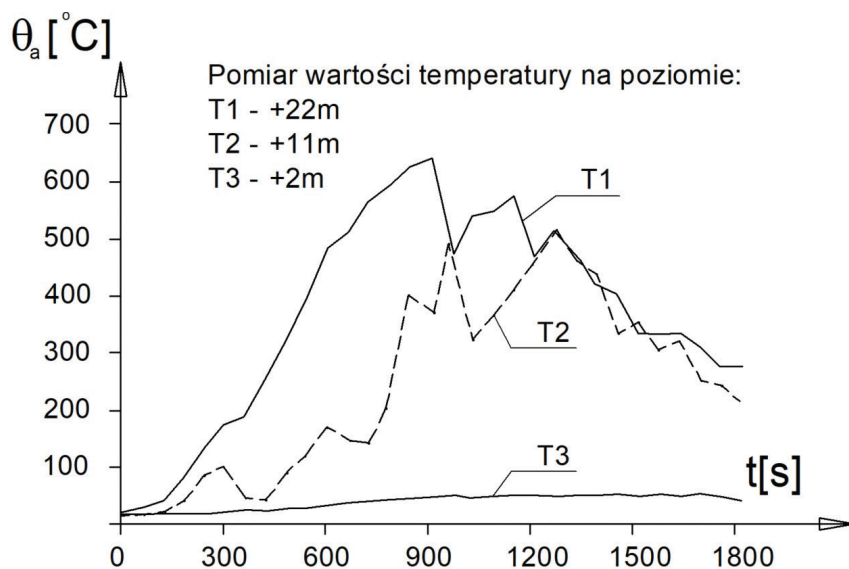
Poszczególne przypadki były natomiast zróżnicowane pod względem prognozowanego modelu zniszczenia. Dla modeli płaskich oraz najbardziej zaawansowanego trójwymiarowego modelu ogrzewanego, według scenariusza pożaru naturalnego (SM3-ih+PN), o nośności decydowało wyboczenie słupka kratownicy, prowadzące do zawalenia się konstrukcji dachu bezpośrednio nad źródłem ognia. Sposób zniszczenia był więc analogiczny w stosunku do opisanej we wstępie awarii w jednej z krajowych elektrociepłowni. Z kolei dla modeli trójwymiarowych ogrzewanych równomiernie według krzywej ISO model zniszczenia był związany z wybożeniem słupa skrajnego. Tego typu uszkodzenia również znajdują potwierdzenie w obserwacjach skutków rzeczywistych pożarów [2].

Podsumowanie

Symulacje komputerowe opracowane dla maszynowni elektrociepłowni wskazują na możliwość zastosowania zaawansowanych modeli rozwoju pożaru oraz odpowiedzi me-

Tabela 1. Opracowane modele maszynowni

Oznaczenie modelu	Zakres modelu	Sposób uwzględnienia płatwi i stężeń przeciwskrętnych	Model pożaru	Klasa przekroju	Imperfekcje
SM2-kl1	wydzielona rama	podpory nieprzesuwne	pożar nominalny	pominięta	pominięte
SM2		podpory nieprzesuwne	pożar nominalny	uwzględniona	pominięte
SM2.1		elementy typu sprężyna	pożar nominalny	uwzględniona	pominięte
SM2.1-PN		elementy typu sprężyna	pożar naturalny	uwzględniona	pominięte
SM2.1-ih+PN		elementy typu sprężyna	pożar naturalny	uwzględniona	uwzględnione
SM3-kl1	analiza całej konstrukcji	uwzględnione w modelu	pożar nominalny	pominięta	pominięte
SM3		uwzględnione w modelu	pożar nominalny	uwzględniona	pominięte
SM3-bz		płatwie uwzględnione, stężenia pominięte	pożar nominalny	uwzględniona	pominięte
SM3-ih		uwzględnione w modelu	pożar nominalny	uwzględniona	uwzględnione
SM3-ih (K2)		uwzględnione w modelu	pożar nominalny	uwzględniona	uwzględnione
SM3-ih+PN		uwzględnione w modelu	pożar naturalny	uwzględniona	uwzględnione



Rys. 4. Wykres wartości temperatury opracowany dla wybranego słupa hali

chanicznej konstrukcji w celu oceny odporności ogniowej obiektów przemysłowych. W przypadku rozpatrywanej hali analiza typu *performance-based* pozwoliła na oszacowanie odporności ogniowej, a także na wskazanie wartości temperatury krytycznej oraz prognozowanych modeli zniszczenia. Wymienione dane mogą zostać wykorzystane do opracowania strategii bezpieczeństwa pożarowego danego obiektu. Obliczenia uwzględniające zaawansowany model rozwoju pożaru

nie pozwoliły jednak w rozpatrywanym przypadku na wykazanie zwiększonej odporności ogniowej w stosunku do analogicznych modeli ograniczających zgodnie z krzywą standardową. Potencjalne korzyści wynikające z zastosowania zaawansowanego modelu pożaru naturalnego mogą być w przypadku obiektów przemysłowych i magazynowych znaczące [10], jednak silnie zależą od indywidualnej charakterystyki danej strefy pożarowej oraz uwzględnionego scenariusza pożarowego.

Tabela 2. Wyniki zaawansowanej analizy konstrukcji – hala maszynowni

Oznaczenie modelu	Odporność ogniowa [s]	Model zniszczenia	Maksymalne ugięcie w środku rozpiętości kratownicy [cm]	Temperatura krytyczna elementu dla którego nastąpiło wyczerpanie nośności [°C]
SM2-kl1	934	Wyboczenie słupka kratownicy RK100x4	40	705
SM2	877	Wyboczenie słupka kratownicy RK100x4	81	695
SM2.1	877	Wyboczenie słupka kratownicy RK100x4	70	695
SM2.1+PN	844	Wyboczenie słupka kratownicy RK100x4	65	702
SM2.1-ih+PN	840	Wyboczenie słupka kratownicy RK100x4	55	702
SM3-kl1	862	Wyboczenie słupka kratownicy RK100x4	28	690
SM3	855	Wyboczenie słupa skrajnego	5	650-708 (pas-środek)
SM3-bz	811	Wyboczenie pasa dolnego kratownicy	1.5	650-705
SM3-ih	829	Wyboczenie słupa skrajnego	2	622-696 (pas-środek)
SM3-ih (K2)	855	Wyboczenie słupa skrajnego	1	650-708 (pas-środek)
SM3-ih+PN	835	Wyboczenie słupka kratownicy RK100x4	20	702

Literatura:

[1] Gwóźdź M., Suchodola M., Bezpieczeństwo pożarowe budowlanych konstrukcji metalowych, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2016.
 [2] Gwóźdź M., Woźniczka P., Tkaczyk A., Odbudowa stalowych hal przemysłowych uszkodzonych w przebyłym pożarze, „Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza”, t. 44, nr 4, 2016, str. 51–66.
 [3] Lu L., Yuan G-g., Huang Z., Shu Q., Li Q., Performance based analysis of large steel truss roof structure in fire, “Fire Safety Journal”, nr 93, 2017, str. 21–38.
 [4] McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K., Fire Dynamics Simulator User’s Guide, NIST, Gaithersburg, Maryland, USA, 2013.
 [5] Franssen J.-M., Gernay T., Modelling structures in fire with SAFIR: Theoretical background and capabilities, “Journal of Structural Fire Engineering”, t. 8, nr 3, 2017, str. 300–323.
 [6] Balazs Z., Distribution of Fire Cases and the Role of Human Factors in Coal-Firing Power Plants in Fuel-Supply Fields and Distribution System, Academic and Applied Research in Military and Public Management Science, t. 14, nr 4, 2015, str. 161–171.
 [7] PN-EN 1991-1-2, 2006, Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-2: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru.
 [8] Carcillo M., Caro A-S., Sonnier R., Ferry L., Gesta E., Lagrève C., Fire behaviour of electrical cables in cone calorimeter: Influence of cables structure and layout, “Fire Safety Journal”, nr 99, 2018, str. 12–21.
 [9] Franssen J.-M., Cowe B., Gernay T., Effective stress method to be used in beam finite elements to take local instabilities into account, “Fire Safety Science”, nr 11, 2014, str. 544–557.
 [10] Woźniczka P., Performance-based analysis of older-type large-space hall in fire, “Archives of Civil Engineering”, t. 65, nr 1, 2019, str. 17–29.

DOI: 10.5604/01.3001.0013.8785

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Woźniczka Piotr, 2020, Zastosowanie zaawansowanej metody oceny odporności ogniowej w budownictwie przemysłowym. „Builder” 04 (273). DOI: 10.5604/01.3001.0013.8785

Streszczenie: W artykule przedstawiono przykład opracowanej oceny odporności ogniowej obiektu przemysłowego. Dla rozpatrywanej hali maszynowni o konstrukcji stalowej zaprezentowano wyniki symulacji rozwoju pożaru oraz odpowiedzi mechanicznej konstrukcji. Obliczenia przeprowadzono za pomocą zaawansowanych programów komputerowych. Omówiono wpływ takich czynników, jak nierównomierne ogrzewanie oraz sposób modelowania konstrukcji na szacowaną odporność ogniową. Wskazano także wartości temperatury krytycznej oraz prognozowane modele zniszczenia. Wykazano, że omawiana metoda może być z powodzeniem stosowana w odniesieniu do rozpatrywanej kategorii obiektów. **Słowa kluczowe:** budownictwo przemysłowe, ocena odporności ogniowej, hala stalowa

Abstract: Application of advanced fire resistance assessment method for industrial structures. Both fire development and mechanical response analysis of the steel turbine hall are described. Factors like non-uniform heating and way of structural modeling and their impact on the anticipated fire resistance of the structure are discussed. Moreover, values of the critical temperature and predicted failure modes are given. As a result it is shown that described method is appropriate for the considered type of buildings.

Key words: industrial structures, fire resistance assessment, steel hall