

Modelowanie komputerowe pożaru stalowej hali magazynu surowców wtórnych

Bezpieczeństwo pożarowe konstrukcji budowlanych w ujęciu normy PN-EN 1991-1-2 [1] można zapewnić, stosując alternatywne metody oceny: uproszczone lub zaawansowane. Podstawowym kryterium podziału metod jest sposób wyznaczenia oddziaływań termicznych na elementy konstrukcji budowlanych. Rozróżnia się metody tradycyjne, w których jest wykorzystywany pożar nominalny według krzywej standardowej, oraz metody uwzględniające właściwości użytkowe obiektu, gdy oddziaływania termiczne są ustalane na podstawie przesłanek fizycznych. W drugim przypadku wartość temperatury można określić za pomocą modelu parametrycznego, modelu strefowego lub wykorzystując obliczeniową mechanikę płynów (computational fluid dynamics; CFD). W przypadku modeli parametrycznego i strefowego obowiązują liczne założenia ograniczające ich praktyczne zastosowanie w wielu sytuacjach projektowych. W szczególności krzywe parametryczne są ważne tylko w odniesieniu do stref pożarowych pozbawionych klap wentylacyjnych w dachu, o powierzchni do 500 m² i wysokości do 4 m [1]. Ograniczenia te uniemożliwiają modelowanie pożaru według krzywej parametrycznej w przypadku budynków halowych, które dominują w budownictwie stalowym. Wykorzystanie w tych budynkach modelu pożaru standardowego jest możliwe, jednak jest to opis spalania niezbyt precyzyjny, który zwykle w sposób istotny różni się od rzeczywistości.

Uniwersalną metodą oceny oddziaływania pożarowego na elementy konstrukcji budowlanych, umożliwiającą dokładne odwzorowanie złożonych zjawisk zachodzących w trakcie pożaru w przypadku dowolnego obiektu, jest wspomagany komputerowo model CFD. Model ten spełnia postulowane przez normę [1] założenia fizyczne: zachowania masy gazu, zmiany momentów pędu równej sumie sił na cząsteczkę gazu oraz zmiany energii równej sumie przyrostu ciepła i pracy wykonanej przez cząsteczkę gazu.

W artykule opisano zastosowanie oprogramowania Fire Dynamics Simulator (FDS), opartego na analogii formalnej modelu obliczeniowego mechaniki płynów do określenia pola temperatury gazu i elementów konstrukcji. Jako przykład modelowania wykorzystano rzeczywisty pożar hali składowania surowców wtórnych, opisany w pracy [3].

Informacje podstawowe o programie FDS

W przypadku zastosowania w analizie pożarowej metody opartej na właściwościach użytkowych obiektu jest konieczne określenie wartości temperatury elementów konstrukcji w czasie oraz mechanicznej odpowiedzi konstrukcji, z uwzględnieniem zmiennych właściwości mechanicznych i fizycznych stali. W odniesieniu do budynków wielkogabarytowych aktualne normy [1] i [2] nie przedstawiają, poza pożarem lokalnym, analitycznego sposobu oszacowania oddziaływań termicznych. Do wyznaczenia pola temperatury w takich budynkach należy wykorzystać zaawansowane programy numeryczne, np. dostępny nieodpłatnie na stronie internetowej National Institute of Standards and Technology program Fire Dynamics Simulator (FDS). Program został opracowany w USA we współpracy z VTT Technical Research Centre of Finland [5]. Oprogramowanie jest oparte na analogii formalnej mechaniki płynów

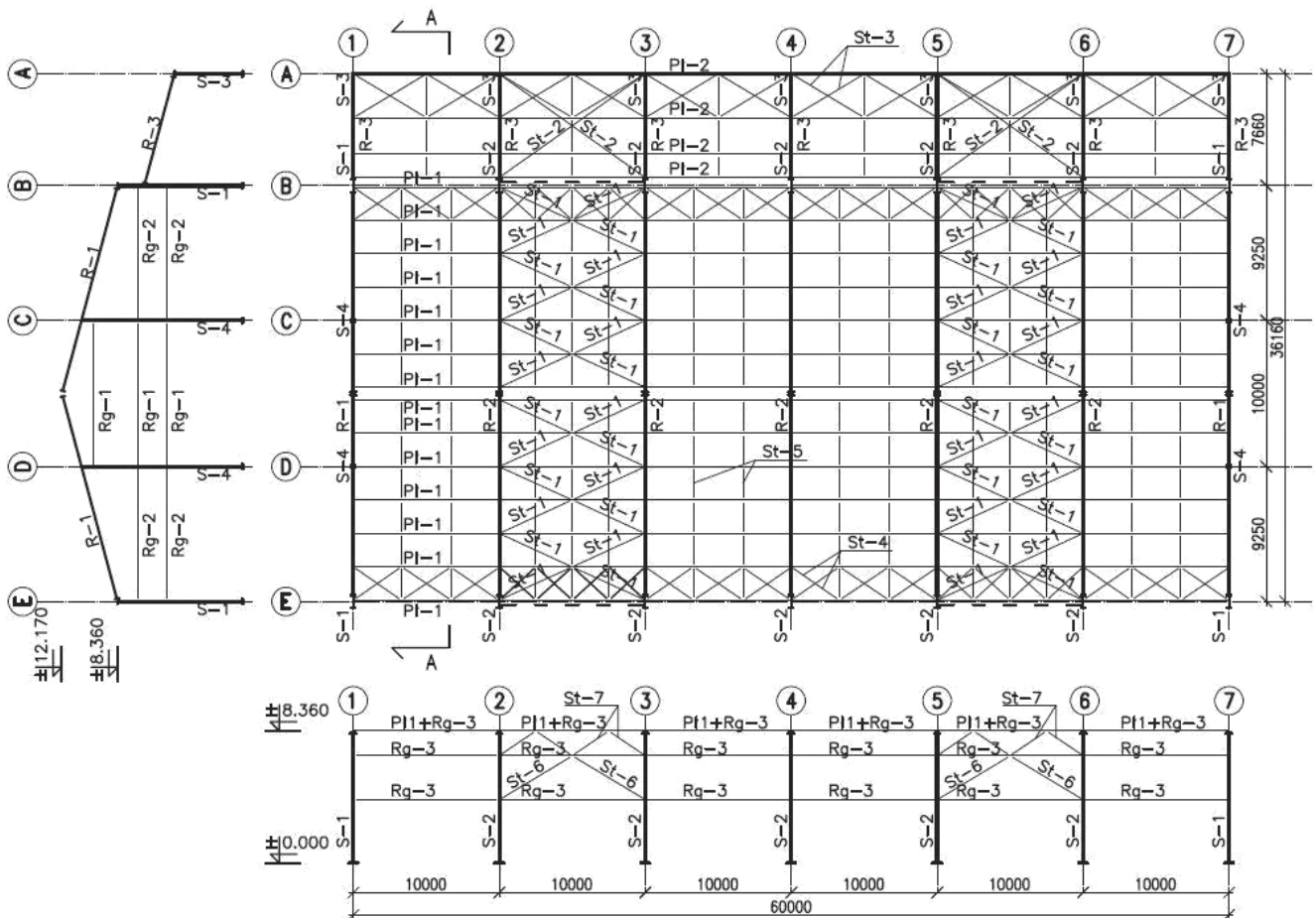
i gazów i umożliwia uwzględnienie w analizie rozwoju pożaru zagadnień takich, jak teoria wielkich wirów (LES – Large Eddy Simulation), konwekcja, promieniowanie, skład chemiczny spalanego materiału oraz kierunek przepływu. Możliwe jest również podanie właściwości materiałowych przegród oraz elementów konstrukcji. W analizowanym przypadku hali modelowano poszycie z blach trapezowych, rygle obudowy ścian oraz słupy i rygle ram głównych. Ze względu na dużą czasochłonność obliczeń oraz możliwości programu, przekroje dwuteowe zastąpiono równoważnymi elementami prostokątnymi. Przyjęto przewodność cieplną oraz ciepło właściwe kształowników stalowych zgodnie ze specyfikacjami z normy [2], uzależniając ich wartości od temperatury stali.

W programie FDS są dostępne różne możliwości modelowania samego procesu spalania składowanych surowców wtórnych, oparte na złożonych procesach chemicznych. Do analizy opisywanego przypadku hali zdecydowano się na zastosowanie sposobu uproszczonego, wykorzystującego szybkość uwalniania ciepła $Q(\dot{t}_i)$. Podejście takie jest, zdaniem autora, wystarczające do potrzeb projektowania konstrukcji budowlanych, a dodatkowo znajduje odzwierciedlenie w rekomendacjach normy [1].

Przykład modelowania programem komputerowym FDS

Hala składowania surowców wtórnych (głównie odpadów z tworzyw sztucznych) jest obiektem parterowym, dwunawowym, z niepełną obudową ścian, o powierzchni zabudowy 1314 m² i kubaturze 12 337 m³, opisanym w pracy [3]. Schemat konstrukcyjny hali oraz oznaczenia elementów montażowych podano według [3] na rys. 1. Do pożaru składowanych odpadów doszło zimą, przy niezaśnieżonych połaciach oraz silnym wietrze. Trwający kilka dni pożar kilkakrotnie przygaszał i rozgorzał ponownie (por. rys. 2). Po zakończeniu akcji gaśniczej przeprowadzono inwentaryzację uszkodzeń elementów konstrukcyjnych, której główne wyniki według pracy [3] przytoczono w tabl. 1. Inwentaryzacja wykazała uszkodzenia obudowy ścian i pokrycia dachu z blachy. Ponadto zostały uszkodzone wszystkie stężenia wiotkie oraz rygle i stężenia ścian zewnętrznych w osiach B i E. Pozostałe elementy nośne, czyli płatwie i ramy poprzeczne, zostały zdeformowane tylko lokalnie albo w ogóle nie doznały widocznych deformacji termicznych. W momencie wybuchu pożaru hala była budynkiem nowym, eksploatowanym zaledwie kilka lat.

Ze względu na charakter składowanego materiału, do określenia wartości obciążenia pożarowego zastosowano parametry rekomendowane w pracy [4], dotyczące plastików i odpadów komunalnych przeznaczonych do wykorzystania jako surowiec wtórny energetyczny. Szybkość spalania zgodnie z danymi zamieszczonymi w [4] można przyjąć o wartościach od 0,018 do 0,034 kg/(m²·s), a ciepło spalania odpadów komunalnych wynosi od 16,7 do 29 MJ/kg. Badania doświadczalne [4] odpadów rozdrobnionych, składających się w 62% z tworzyw sztucznych i 23% z biomasy (drewno i masa organiczna) o małej wilgotności wykazały wartość ciepła spalania około 20 MJ/kg. Biorąc pod uwagę stan składowanych odpadów w momencie wybuchu pożaru (brak przetworzenia oraz czę-



Rys. 1. Schemat konstrukcji wiaty składowania surowców wtórnych [3]



Rys. 2. Pożar wiaty składowania surowców wtórnych [3] (fot. M. Gwóźdź)

Tablica 1

Inwentaryzacja deformacji geometrycznych prętów ram hali po pożarze [3]

| Rama | Element ramy | Rodzaj imperfekcji | Kierunek imperfekcji | Imperfekcja mm | Tolerancja według EN 1090 |
|------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|----------------|-----------------------------------|
| Rama 1 | stłup 1E | wygięcie łukowe $e_{fi,o}$ | słaba oś przekroju z | 90 | $\frac{h}{750} = 12 \text{ mm}$ |
| Rama 2 | rygiel | pofalowanie pasa dolnego Δ | oś pręta x | 20 | $\frac{b}{750} = 3 \text{ mm}$ |
| Rama 6 | rygiel | wybrzuszenie średnika Δ | oś pręta x | 45 | $\frac{h_w}{100} = 10 \text{ mm}$ |
| Ramy B i E | rygle | wygięcie łukowe $e_{fi,o}$ | oś przekroju y | 30÷50 | $\frac{l}{100} = 12 \text{ mm}$ |

ściowe narażenie na oddziaływania atmosferyczne), maksymalną szybkość wydzielania ciepła oszacowano ze wzoru

$$RHR_f = Q_s v, \quad (1)$$

w którym:

Q_s – ciepło spalania; przyjęto 16,7 MJ/kg,
 v – szybkość spalania; przyjęto 0,018 kg/(m²·s).

Obliczona ze wzoru (1) wartość $RHR_f = 300 \text{ kW/m}^2$ jest zbliżona do wartości szybkości uwalniania ciepła określonej w normie [1] w przypadku biur i obiektów zamieszkania zbiorowego. Przebieg wydzielania ciepła (w kW/m²) w pożarze hali modelowano zgodnie z rekomendacjami [1] jako pożar t-kwadrat opisany równaniami:

$$Q(t_{fi}) = \begin{cases} 10^3 t_{fi} / t_{\alpha} & \text{przy } 0 \leq t_{fi} < 328, \\ 300 & \text{przy } 328 \leq t_{fi} < 29\,400, \\ (-0,012t_{fi} + 652,8) & \text{przy } 29\,400 \leq t_{fi} < 54\,400, \end{cases} \quad (2)$$

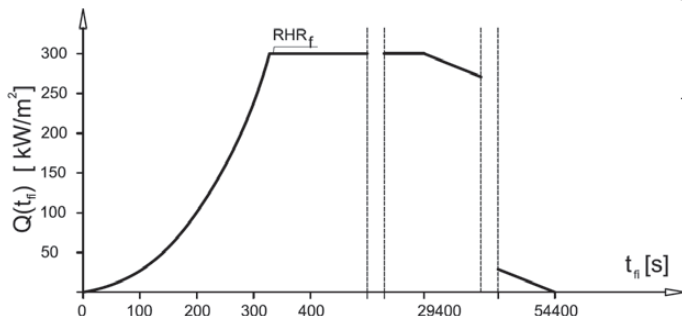
w których:

t_{fi} – czas trwania pożaru, s,

t_{α} – czas wymagany do osiągnięcia szybkości wydzielania ciepła o wartości 1 MW.

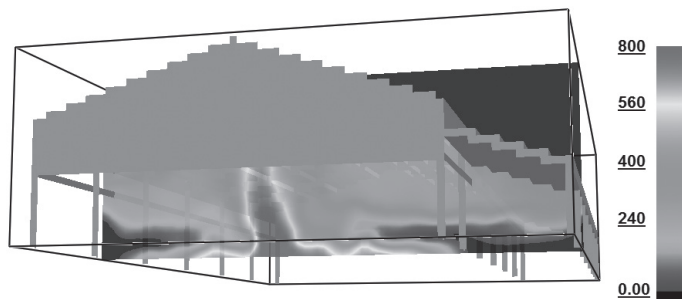
Jako obszar płonący przyjęto pełną powierzchnię nawy głównej hali. W związku z obserwacją rzeczywistego przebiegu spalania się składowanego materiału pożar zaklasyfikowano według normy [1] jako wolny, w odniesieniu do którego przyjęto parametr $t_{\alpha} = 600$. Ponadto oszacowano, że faza wzrostu trwała 328 s, faza rozgorzenia około 8 h, natomiast faza stygnięcia kolejne 7 h. Założono, że początek stadium zaniku pożaru odpowiada wypaleniu się 70% składowanych materiałów, o gęstości nasypowej 250 kg/m³ i średniej wysokości składowania 3,00 m. Wykorzystaną w programie FDS funkcję wydzielania ciepła w czasie przedstawiono na rys. 3. Niezbędny do przeprowadzenia obliczeń skład chemiczny płonącego materiału przy-

jęto w sposób uproszczony, zalecany w pracy [5], z wartościami funkcji odpowiadających za produkcję tlenku węgla i sadzy wynoszącymi odpowiednio: $CO_YIELD = 0,063$ i $SOOT_YIELD = 0,163$. Na podstawie archiwalnych danych meteorologicznych określono warunki pogodowe w czasie pożaru. Zamodelowano ciągły wiatr północno-zachodni, o średniej prędkości 5,5 m/s, oraz temperaturę średniodobową powietrza w chwili rozpoczęcia analizy numerycznej równą 0°C.

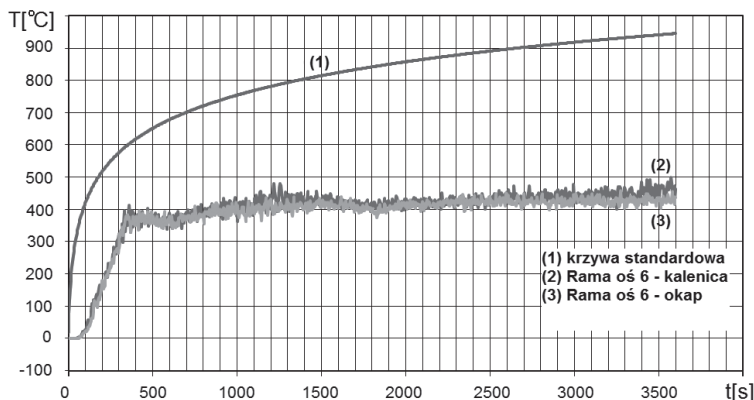


Rys. 3. Funkcja szybkości uwalniania ciepła $Q(t_f)$ przyjęta do obliczeń numerycznych

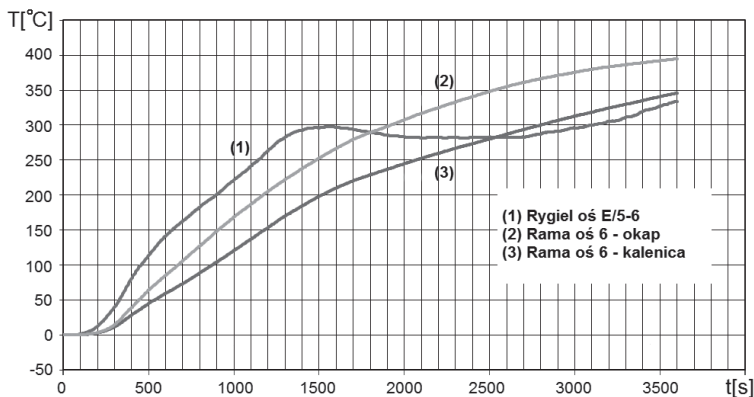
Rezultaty przeprowadzonych obliczeń komputerowych przedstawiono na rys. 4, na którym pokazano pole temperatury gazu pomiędzy osiami 5 i 6 po 30 min trwania pożaru. Na rysunku 5 pokazano krzywe temperatury gazu pod pokryciem dachowym, o wartości maksymalnej 400÷500°C, które po rozgorzeniu nie wykazują trendu rosnącego. Na tym samym rysunku naniesiono krzywą standardową ISO (por. [1]), która różni się znacząco od symulowanego „pożaru rzeczywistego”. Ponadto program oblicza także temperaturę bezpośrednio na kształtownikach stalowych. Wybrane przykładowe krzywe temperatura – czas w przypadku prętów ramy głównej (kalenica i okap ramy w osi 6/E) przedstawiono na rys. 6. Z wykresów wynika, że po 60 min pożaru maksymalna temperatura rygla ramy 6/E nie przekracza 300÷400°C.



Rys. 4. Pole temperatury gazu pomiędzy osiami 5 i 6 w chwili $t = 30$ min



Rys. 5. Krzywe temperatury gazu pod pokryciem dachu (2) i (3), krzywa standardowa (1)



Rys. 6. Krzywe temperatury na powierzchni profili stalowych rygli

Podsumowanie

W pracy [3] przeprowadzono kontrolne obliczenia statyczno-wytrzymałościowe omawianej hali, z uwzględnieniem zinventaryzowanych deformacji prętów. Udokumentowane deformacje słupów i rygli ram wskazywały, że konstrukcja prętowa na ogół nie została ogrzana do temperatury ponad 300°C.

Z takiego oszacowania wynika współczynnik konwersji granicy plastyczności o wartości $k_{y,\theta} = 1,0$ podanej w normie [2]. W obliczeniach analizowano 6 różnych przypadków równomiernego i nierównomiernego ogrzania konstrukcji do temperatury 300°C, a otrzymane rezultaty wyrażone w naprężeniach normalnych $\sigma_{\theta,x}$ podano w tabl. 2. Maksymalne wartości naprężeń normalnych według tych danych przekraczają granicę plastyczności stali S355 w słupach ramy skrajnej oraz w ryglach ścian podłużnych, czyli rezultaty symulacji komputerowych tłumaczą udokumentowane po pożarze deformacje plastyczne słupa 1E i rygli ścian bocznych B i E według tabl. 1.

Tablica 2
Naprężenia normalne $\sigma_{\theta,x}$ [MPa] w przekrojach wybranych prętów wiaty [3]

| Element hali | Przypadek symulacji komputerowej pożaru G + W + ($\theta = 300^\circ\text{C}$) | | | | | |
|----------------------|--|--------------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| | ogrzana cała hala | ogrzone dwie ramy - osie 1 i 2 | ogrzone sam dach | wszystkie słupy ogrzone do połowy | ogrzone dwie wewnętrzne ramy | ogrzone stężenia i rygle |
| 1. Rygiel ramy, os 1 | 125 | 117 | 277 | 28 | 51 | 259 |
| 2. Słupy, os 1 | 527 | 445 | 707 | 27 | 131 | 736 |
| 3. Rygiel ramy, os 2 | 175 | 127 | 148 | 47 | 88 | 39 |
| 4. Słupy, os 2 | 331 | 251 | 71 | 122 | 209 | 122 |
| 5. Rygle, os 1 | 107 | 107 | 31 | 36 | 35 | 145 |
| 6. Słupy ściany 1 | 51 | 50 | 264 | 20 | 25 | 204 |
| 7. Rygle, os E | 104 | 417 | 529 | 34 | 123 | 233 |
| 8. Stężenia, os E | 48 | 40 | 302 | 8 | 111 | 229 |
| 9. Płatwie* | 236 | 415 | 383 | 55 | 444 | 95 |
| 10. Rygle, os B | 129 | 447 | 673 | 39 | 45 | 340 |

* Maksymalne naprężenia – płatwie okapowe i kalenicowe.

Omówione w niniejszym artykule modelowanie pożaru w tej samej hali przy użyciu programu Fire Dynamics Simulator (FDS) potwierdziło poprawność oszacowania pośredniego (udokumentowane deformacje) oddziaływań pożarowych na konstrukcję stalową prętową przyjętych w pracy [3]. Modelowanie programem FDS stworzyło ponadto przesłanki do zaprojektowania racjonalnych

zabezpieczeń ogniochronnych konstrukcji w ramach realizacji programu remontu hali po przebyłym pożarze. W miejsce kosztownych ogniochronnych powłok malarskich o znacznej grubości – dobranych w dostosowaniu do krzywej standardowej (nr 1) pokazanej na rys. 5 – jest możliwe zaprojektowanie dużo cieńszych i tańszych powłok ogniochronnych według obwiedni krzywych (nr 2 i nr 3).

Należy zauważyć, że takie ujęcie bezpieczeństwa pożarowego omawianej hali jest zgodne ze standardem obliczeniowym rekomendowanym w normie PN-EN 1991-1-2 [1].

Uzyskane wyniki stanowią również podstawę do zaawansowanej analizy mechanicznej w pełni uwzględniającej nieliniowości geometryczne i materiałowe.

PIŚMIENNICTWO

- [1] PN-EN 1991-1-2 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-2: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania w warunkach pożaru.
- [2] PN-EN 1993-1-2 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-2: Reguły ogólne – Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe.
- [3] *Gwóźdź M., Tkaczyk A., Woźniczka P.*: Odbudowa stalowych hal przemysłowych uszkodzonych w przebyłym pożarze. „Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza”, nr 4/2016.
- [4] *Jodkowski W., Sitka A., Szumilo B.*: Gasification of the oversize fraction of municipal waste with thermal power generation. „Archives of Waste Management and Environmental Protection”, no 3/2014.
- [5] *McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K.*: Fire Dynamics Simulator User's Guide. NIST, Gaithersburg, Maryland, USA 2013.
- [6] *Tuhtar D.*: Fire and explosion protection: A Systems Approach. Ellis Horwood Limited, Chichester 1989.