

PROF. DR HAB. INŻ. ANTONI BIEGUS
Politechnika Wrocławska

Ocena ognioodporności stalowych belek i słupów z wykorzystaniem euronomogramów – cz. II

Zapewnienie bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji stalowych w warunkach pożaru najczęściej uzyskuje się, stosując izolację termiczną. Ośłania ona stalowy ustrój nośny obiektu przed działaniem ognia, chroniąc go przed zbyt gwałtownym nagrzewaniem w warunkach pożaru [2]. Takie tradycyjne projektowanie ogranicza się do prostego wyboru, tzw. biernej ochrony przeciwpożarowej, i nie przeprowadza się wówczas żadnych analiz obliczeniowych oceniających zachowanie się konstrukcji stalowej w warunkach pożaru. Stąd rezultat takiego postępowania nie zawsze jest wiarygodny [4].

Ocena bezpieczeństwa pożarowego elementów stalowych metodą nośności na podstawie euronomogramów

Ocena bezpieczeństwa pożarowego metodą nośności polega na obliczeniu wytrzymałości elementu stalowego w podwyższonej temperaturze $R_{f,t,d}$ po upływie wymaganego czasu ognioodporności i porównaniu jej z efektem oddziaływań na konstrukcje w warunkach pożaru $E_{f,d}$, tj. sprawdzeniu warunku (3). Zastosowana w PN-EN 1993-1-2 [9] metoda nośności oceny ognioodporności konstrukcji stalowych jest kompatybilna z zasadami obliczania jej nośności w normalnej temperaturze według PN-EN 1993-1-1 [8]. Umożliwia ona ocenę w warunkach pożaru nie tylko wytrzymałości elementów rozciąganych oraz zginanych zabezpieczonych przed zwichrzeniem, ale również nośności elementów ściskanych z warunku wy-

boczenia oraz zginanych z warunku zwichrzenia.

Według PN-EN 1993-1-2 [9] obliczeniową nośność w warunkach pożaru $R_{f,t,d}$ na rozciąganie $N_{f,t,Rd}$ na wyboczenie $N_{b,f,t,Rd}$ i z warunku zwichrzenia $M_{b,f,t,Rd}$ elementów o przekrojach klas 1, 2 lub 3, wyznacza się ze wzorów:

$$N_{f,t,Rd} = N_{t,Rd} k_{y,\theta} \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,f}}, \quad (8)$$

$$N_{b,f,t,Rd} = \chi_{fi} N_{c,Rd} k_{y,\theta} \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}}, \quad (9)$$

$$M_{b,f,t,Rd} = \chi_{LT,fi} M_{c,Rd} k_{y,\theta} \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}}, \quad (10)$$

gdzie:

$N_{t,Rd}$, $N_{c,Rd}$, $M_{c,Rd}$ – obliczeniowe nośności przekroju na rozciąganie, na ściskanie i na zginanie w normalnej temperaturze, obliczone według PN-EN 1993-1-1 [8],

χ_{fi} , $\chi_{LT,fi}$ – współczynniki wyboczenia i zwichrzenia w warunkach pożaru według PN-EN 1993-1-2 [9],

$\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,0$ – częściowe współczynniki nośności.

Algorytmy wyznaczania nośności elementów stalowych w pożarze z warunku utraty stateczności ogólnej według PN-EN 1993-1-2 [9] różnią się w niektórych aspektach od procedur obliczania nośności elementów na wyboczenie lub na zwichrzenie w normalnej temperaturze, według PN-EN 1993-1-1 [8]. Różnice dotyczą przede wszystkim konieczności przyjmowania wielokrotnych krzywych niestateczności ogólnej analizowanych prętów. Wynika to z potrzeby uwzględnienia zmian parametrów granicy plastyczności oraz modułu sprężystości podłużnej stali w podwyższonych temperaturach, które bezpośrednio decydują o nośności z warunku utraty stateczności ogólnej.

Krzywe wyboczeniowe w warunkach pożaru obliczone według [9] są zredukowane w stosunku do krzywych niestateczności w temperaturze normalnej [8]. Ponadto wzrost temperatury stali w warunkach pożaru powoduje wzrost redukcji wartości współczynnika wyboczeniowego [12].

Współczynniki niestateczności: wyboczenia χ_{fi} oraz zwichrzenia $\chi_{LT,fi}$ według PN-EN 1993-1-2 [9] są funkcjami m.in. smukłości względnych w warunkach pożaru: wyboczenia $\bar{\lambda}_\theta$ lub zwichrzenia $\bar{\lambda}_{LT,\theta}$ elementów stalowych. Smukłości względne analizowanych prętów zależą od temperatury stali $\theta_{a,t}$, gdyż są funkcją współczynników redukcyjnych: granicy plastyczności stali $k_{y,\theta}$ i modułu sprężystości podłużnej stali $k_{E,\theta}$. Stąd współczynniki niestateczności wyboczenia i zwichrzenia wyznacza się iteracyjnie, co stanowi uciążliwość tej procedury oceny niestateczności ogólnej prętów w warunkach pożaru.

Bezpośrednie określenie (z pominięciem iteracji) nośności na wyboczenie stalowych prętów w warunkach pożaru zaproponowano w [14] (na podstawie

wyników projektu badawczego Europejskiej Konwencji Konstrukcji Stalowych (ECSC) [5]).

Obliczeniową nośność na wyboczenie elementów stalowych w warunkach pożaru i według [14] wyznacza się ze wzoru:

$$N_{b,fi,t,Rd} = f'_{y,\theta,\bar{\lambda}} A, \quad (11)$$

gdzie:

$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$ – graniczne naprężenia ściskające, które zależą od smukłości względnej pręta $\bar{\lambda}$ w temperaturze 20°C, temperatury stali $\theta_{a,t}$ i gatunku stali (np. dla stali S235 podano je w tab. 3),

A – pole przekroju pręta ściskanego.

Tabele granicznych naprężeń ściskających $f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$ dla stali S275, S355 i S460 podano w [3] i [14]. Korzystając z nich, na podstawie smukłości względnej $\bar{\lambda}$ obliczonej według [8] (tj. w temperaturze normalnej), temperatury stali $\theta_{a,t}$ określa się naprężenia $f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$ i wyznacza się obliczeniową nośność pręta na wyboczenie wg (11). Przy wykorzystaniu nomogramów określa się czas potrzebny na osiągnięcie temperatury krytycznej i ocenia nośność ogniową analizowanego elementu stalowego.

Uwagi i wnioski końcowe

Obiektywną ocenę ognioodporności konstrukcji stalowych można uzyskać na podstawie jej analizy termiczno-statycznie-wytrzymałościowej, stosując metody oparte na właściwościach. Na podstawie uzyskanych pól temperatury w elementach i kombinacji oddziaływań można ocenić zachowanie w warunkach pożaru konstrukcji, rozważając jej modele 3D lub 2D. Metoda ta umożliwia elastyczność w wyborze rozwiązań technicznych spełniających wymagania ognioodporności budowli i uwzględnia intensywność oddziaływania pożaru. Wymaga ona jednak stosowania zaawansowanych modeli obliczeniowych (przeprowadza się je MES i korzysta z programów komputerowych).

W projektowaniu na warunki pożarowe konstrukcji stalowych stosunkowo prostych budynków stosuje się metodę tradycyjną. Ogranicza się ona do wyboru zabezpieczeń ognioizolujących i wówczas nie przeprowadza się żadnych obliczeń oceniających zachowanie się konstrukcji w pożarze. W wielu przypadkach takie projektowanie może ►

reklama

Klasa przekroju	Współczynnik przystosowania K_1 elementu		
	ekspozowanego z 4 stron, bez względu na osłonięcie	osłoniętego z 3 stron i stykającego się z płytą stropową zespoloną lub żelbetową po stronie 4	Nieosłoniętego i ekspozowanego z 3 stron i stykającego się z płytą stropową zespoloną lub żelbetową po stronie 4
1, 2	1,00	0,85	0,70
3 ¹⁾	1,00	0,85	0,70
¹⁾ $\theta_{a,max}$ określone dla A_m/V przekroju ekspozowanego z 4 stron			

■ Tab. 1. Współczynniki K_1 elementu o nierównomiernym rozkładzie temperatury w przekroju [9]

Klasa przekroju	Współczynnik przystosowania K_2 elementu	
	na podporach elementów statycznie niewyznaczalnych ²⁾	w elementach statycznie wyznaczalnych i w przęsłach elementów statycznie niewyznaczalnych
1, 2	0,85	1,00
3 ¹⁾	0,85	1,00
¹⁾ $\theta_{a,max}$ określone dla A_m/V przekroju ekspozowanego z 4 stron		
²⁾ Dotyczy też podpór belek wspornikowych i podpór przęseł sąsiadujących z przewieszeniem		

■ Tab. 2. Współczynniki K_2 elementu o nierównomiernym rozkładzie temperatury na jego długości [9]

S235	Temperatura stali $\theta_{a,t}$								
	400°C	450°C	500°C	550°C	600°C	650°C	700°C	750°C	800°C
$\bar{\lambda}(20^\circ\text{C})$	$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}} [\text{N/mm}^2]$								
0,0	235	209	183	147	110	82	54	40	26
0,1	218	194	171	136	102	76	50	37	24
0,2	202	180	159	127	94	70	46	34	22
0,3	187	167	147	117	87	64	42	31	21
0,4	171	154	136	108	80	59	38	29	19
0,5	156	140	124	98	72	53	34	26	18
0,6	140	127	113	89	65	47	30	23	16
0,7	126	114	102	80	58	42	26	21	15
0,8	112	102	91	71	51	37	23	18	13
0,9	99	90	81	63	45	33	20	16	12
1,0	88	80	73	56	40	29	18	14	11
1,1	78	71	65	50	35	25	16	13	9
1,2	70	64	58	45	31	23	14	11	8
1,3	62	57	52	40	28	20	12	10	8
1,4	56	51	47	36	25	18	11	9	7
1,5	50	46	42	32	22	16	10	8	6
1,6	45	42	38	29	20	15	9	7	6
1,7	41	38	35	26	18	13	8	7	5
1,8	37	34	31	24	17	12	7	6	5
1,9	34	31	29	22	15	11	7	5	4
2,0	31	29	26	20	14	10	6	5	4

■ Tab. 3. Graniczne naprężenia ściskające $f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$ dla stali S235 [14]

► być zbyt zachowawcze. Często nawet uproszczona ocena bezpieczeństwa konstrukcji stalowych w warunkach pożaru umożliwia odstępianie od stosowania izolacji ogniochronnej lub zmniejszenie jej grubości. Ponadto brak analizy zachowania się konstrukcji stalowej w pożarze np. swobody odkształceń termicznych i stopnia „skrępowania” jej elementów, może być przyczyną awarii lub katastrofy. Gdy element stalowy ma pełną swobodę odkształceń termicznych (zarówno wydłużania, jak i obrotów w węzłach i połączeniach), można przyjąć, że w wyniku rosnącej jego temperatury nie powstają żadne dodatkowe siły wewnętrzne. Jeśli zaś ten warunek nie jest spełniony (występują odkształcenia termiczne oraz „skrępowanie” konstrukcji), należy w analizie termiczno-statyczno-wytrzymałościowej uwzględnić m.in. wydłużenia termiczne.

Metoda nośności i metoda temperatury krytycznej według PN-EN 1993-1-2 [9] umożliwiają relatywnie prostą weryfikację ognioodporności konstrukcji stalowych. Dotyczą one analizy elementu (według modelu 1D) i wówczas w obliczeniach pomija się siły wewnętrzne wywołane wymuszonymi lub ograniczonymi wydłużeniami, a także ich deformacje. Ich procedury obliczeniowe można znacząco uprościć, korzystając z euronogramów [10]–[15]. Metodę nośności można stosować w ocenie ognioodporności „wyizolowanych” elementów stalowych rozciąganych, ściskanych (na wyboczenie) lub/i zginanych (na zwichrzenie). □

Piśmiennictwo

1. Biegus A.: *Projektowanie konstrukcji stalowych z uwagi na warunki pożarowe według Eurokodów*. „Izolacje”, nr 2/2013.
2. Biegus A.: *Zabezpieczenia ogniochronne konstrukcji stalowych*. „Izolacje”, nr 3/2013.
3. Biegus A., Mądry D.: *Praktyczne aspekty projektowania konstrukcji stalowych z uwagi na warunki pożarowe*. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 10/2013.
4. Biegus A.: *Awaria stalowego dachu hali produkcyjno-magazynowej spowodowana pożarem*. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 3/2014.
5. ECSC project: „Buckling curves of hot rolled H sections submitted to fire”; CN° 7210-SA/316/515/618/931.
6. Giżejowski M., Król P.: *Projektowanie stalowych elementów rozciąganych, ściskanych i zginanych z uwagi na warunki pożarowe według PN-EN 1993-1-2*. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 9/2008.
7. *PN-EN 1991-1-2: 2006 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-2: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru*.
8. *PN-EN 1993-1-1: 2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*.
9. *PN-EN 1993-1-2: 2007 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-2: Reguły ogólne – Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe*.
10. SD004a-EN-EU Nomogram for unprotected members, <http://www.steel-access.com>.
11. SD005a-EN-EU Nomogram for protected members, <http://www.steel-access.com>.
12. SD008a-EN-EU Buckling factors at elevated temperature, <http://www.steel-access.com>.
13. SD009a-EN-EU Critical temperatures for the design fire resistance of steel beams and members in tension, <http://www.steel-access.com>.
14. SD0010a-EN-EU Limiting compressive stresses for the design fire resistance of steel columns, <http://www.steel-access.com>.
15. <http://www.arcelormittal.com>.