

prof. dr hab. inż. Antoni Biegus*

Usprawnienie oceny nośności elementów stalowych w warunkach pożaru

The improvement of efficiency of the fire resistance assessment for steel structures

Streszczenie. W artykule omówiono usprawnienia analiz termicznych i obliczeń nośności konstrukcji stalowych w warunkach pożaru. Przedstawiono oceny nagrzewanie się elementów stalowych i ich ognioodporności metodą nośności wg PN-EN 1993-1-2 oraz uproszczone sposoby oszacowania nośności na wybozczenie prętów stalowych, z pominięciem obliczeń iteracyjnych.

Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe, nośność w warunkach pożaru, analiza termiczna.

Tradycyjna metoda projektowania konstrukcji stalowych w warunkach pożaru ogranicza się do wyboru środków ognioizolujących i nie wykonuje się wówczas żadnych obliczeń jej wytrzymałości. Takie projektowanie jest w wielu przypadkach zbyt zachowawcze, gdyż stosowanie izolacji ogniochronnej nie zawsze jest niezbędne. Postęp wiedzy w dziedzinie inżynierii pożarowej, dostępne programy komputerowe i uproszczone sposoby oceny bezpieczeństwa konstrukcji stalowych w warunkach pożaru, np. [1, 2] umożliwiają często odstępnie od stosowania izolacji ogniochronnej, której koszt wynosi nawet 40% kosztu konstrukcji. W artykule podano usprawnienie analizy termicznej oraz uproszczone sposoby oceny nośności konstrukcji stalowych w warunkach pożaru, z pominięciem obliczeń iteracyjnych.

Zachowanie się oraz analiza termiczna elementów stalowych

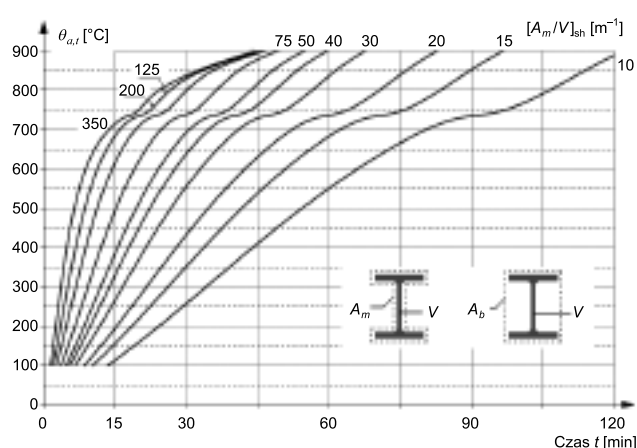
Miara szybkości nagrzewania się elementów stalowych w pożarze są wskaźniki masywności przekroju bez izolacji A_m/V , bez izolacji z uwzględnieniem współczynnika cienia $k_{sh}(A_m/V) = k_{sh}(A_B/V)$ i z izolacją ogniochronną A_p/V , gdzie: A_m, A_p, A_b – pole powierzchni (na jednostkę długości) przekroju bez izolacji, umownego przekroju skrzynkowego i przekroju z izolacją ogniochronną (rysunki 1, 2), V – objętość (na jednostkę długości), współczynnik efektu cienia $k_{sh} = 0,9$ dla dwuteowników i $k_{sh} = 1,0$ dla innych kształtowników [2].

Określenie zależności między temperaturą stalowego elementu $\theta_{a,t}$ i czasem t jej osiągnięcia umożliwia identyfikację m.in. stopnia wytrzymałości konstrukcji w pożarze. Wzrost temperatury zależy m.in. od wskaźnika masywności przekroju $k_{sh}(A_b/V)$, A_p/V , grubości warstwy izolacji ogniochronnej d_p i jej przewodności cieplnej λ_p , które wyraża wskaźnik izolacyjności przekroju $k_p = (A_p/V)(\lambda_p/d_p)$. Nagrzewanie elementów stalowych bez izolacji i z izolacją ogniochronną $\theta_{a,t}(t)$ wg [2] wyznacza się przyrostową metodą analityczną. Na rysunkach 1 i 2 [4] podano nomogramy temperatury stali $\theta_{a,t}(t)$ stalowych elementów bez izolacji oraz z izolacją ogniochronną, o różnych współczynnikach masywności. Umożliwiają one pominięcie przyrostowych obliczeń temperatury stali $\theta_{a,t}(t)$ zaproponowanych w [2].

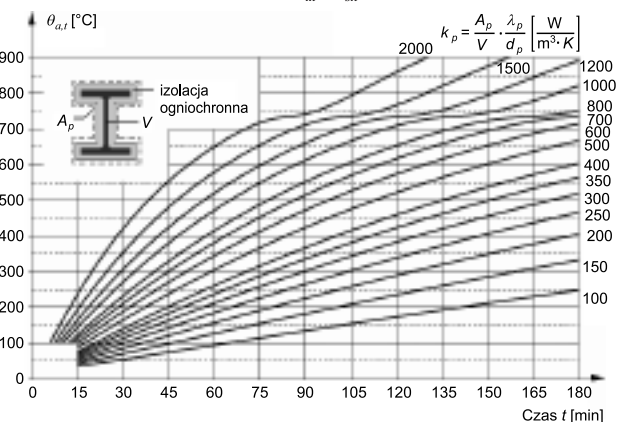
* Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

Abstract. Paper contains the improvement of efficiency of thermal analysis and calculation of the fire resistance of structures. The assessment of warming up and fire resistance of steel members according to PN-EN 1993-1-2 was presented. The simplified methods of buckling resistance assessment of steel members neglecting the iteration procedure of calculations were given.

Keywords: steel structures, fire resistance, thermal analysis.



Rys. 1. Nomogramy temperatury stali $\theta_{a,t}$ w funkcji czasu t stalowych elementów bez izolacji ogniochronnej, przy ich różnych współczynnikach masywności $[A_m/V]_{sh}$ [4]



Rys. 2. Nomogramy temperatury stali $\theta_{a,t}$ w funkcji czasu t stalowych elementów osłoniętych izolacją ogniochronną, przy ich różnych wskaźnikach izolacyjności przekroju k_p [4]

Uproszczone sposoby oceny bezpieczeństwa elementów stalowych

Konstrukcje stalowe należy projektować w sposób, który zapewni im m.in. nośność obliczeniową w warunkach pożaru $R_{fi,d,t}$ przez czas $t_{fi,d,req}$ w których są one narażone na działanie wysokiej

temperatury. Prosta metoda nośności wg [2] umożliwia ocenę w warunkach pożaru wytrzymałości rozciąganych, ściskanych i zginanych elementów stalowych, bez izolacji i z izolacją ogniochronną. Obliczeniowe nośności elementów $R_{f_i,d,t}$ określa się, modyfikując odpowiednie nośności elementów w normalnej temperaturze wg [3]. Zgodnie z [2] degradację w podwyższonej temperaturze granicy proporcjonalności f_p , granicy plastyczności f_y i modułu sprężystości podłużnej E uwzględnia się, stosując współczynniki redukcyjne granicy proporcjonalności $k_{p,\theta}$, granicy plastyczności $k_{y,\theta}$ i modułu sprężystości $k_{E,\theta}$.

W przypadku elementów o przekrojach klas 1, 2 lub 3 i równomiernym rozkładzie temperatury $\theta_{a,t}$, ich obliczeniową nośność w warunkach pożaru $R_{f_i,d,t}$ na rozciąganie $N_{b,f_i,t,Rd}$ na wyoboczenie $N_{b,f_i,t,Rd}$ i z warunku zwichrzenia $M_{b,f_i,t,Rd}$ wyznacza się ze wzorów

$$N_{f_i,\theta,Rd} = N_{t,Rd} k_{y,\theta} \frac{\gamma_{MO}}{\gamma_{M,f_i}} \quad (1)$$

$$N_{b,f_i,t,Rd} = \chi_{f_i} N_{c,Rd} k_{y,\theta} \frac{\gamma_{MO}}{\gamma_{M,f_i}} \quad (2)$$

$$M_{b,f_i,t,Rd} = \chi_{LT,f_i} M_{c,Rd} k_{y,\theta} \frac{\gamma_{MO}}{\gamma_{M,f_i}} \quad (3)$$

gdzie:

$N_{t,Rd}$, $N_{c,Rd}$, $M_{c,Rd}$ – obliczeniowe nośności przekroju na rozciąganie, na ściskanie i na zginanie w normalnej temperaturze (20 °C), obliczone wg [3]; χ_{f_i} , χ_{LT,f_i} – współczynniki wyoboczenia i zwichrzenia w warunkach pożaru wg [2],

γ_{MO} , γ_{M,f_i} – częściowe współczynniki nośności odpowiednio w temperaturze normalnej wg [3] i w warunkach pożaru wg [2], które wynoszą $\gamma_{MO} = 1,0$, $\gamma_{M,f_i} = 1,0$.

Współczynniki niestateczności χ_{f_i} i χ_{LT,f_i} wg [2] są funkcjami m.in. smukłości względnych w warunkach pożaru: wyoboczenia λ_θ lub zwichrzenia $\bar{\lambda}_{LT,\theta}$. Zależą one od temperatury stali $\theta_{a,t}$, gdyż są funkcją współczynników redukcyjnych: granicy plastyczności $k_{y,\theta}$ i modułu sprężystości $k_{E,\theta}$. Współczynniki niestateczności χ_{f_i} i χ_{LT,f_i} wyznacza się iteracyjnie, co stanowi uciążliwość tej procedury oceny niestateczności ogólnej prętów.

Bezpośrednie określenie (z pominięciem iteracji) nośności na wyoboczenie stalowych prętów w warunkach pożaru $N_{b,f_i,t,Rd}$ przedstawiono w [1] i wyznacza się je ze wzoru:

$$N_{b,f_i,t,Rd} = f'_{y,\theta,\bar{\lambda}} A \quad (4)$$

gdzie:

$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$ – graniczne naprężenia ściskające, które zależą od smukłości pręta $\bar{\lambda}$ w temperaturze 20 °C, temperatury stali $\theta_{a,t}$ i gatunku stali (np. dla stali S235 podano je w tabeli 1);

A – pole przekroju pręta ściskanego.

Tabele naprężeń $f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$ dla stali S275, S355 i S460 podano w [1, 4]. Korzystając z nich, na podstawie smukłości $\bar{\lambda}$, temperatury stali $\theta_{a,t}$ określa się naprężenia $f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$ i oblicza nośność pręta na wyoboczenie $N_{b,f_i,t,Rd}$ wg (4). Stosując nomogramy przedstawione na rysunkach 1 i 2 określa się czas potrzebny na osiągnięcie temperatury krytycznej i ocenia nośność ogniową elementu.

Uproszczenie oszacowania nośności na wyoboczenie prętów w pożarze prętów uzyskuje się, korzystając ze zredukowanych współczynników wyoboczeniowych χ_{f_i} , które podano w tabeli 2 [5]. Obliczono je, przyjmując smukłość w warunkach pożaru $\bar{\lambda}_\theta = 1,3 \bar{\lambda}$. W ocenie nośności prętów na wyoboczenie wg (2), korzystając z tabeli 2, wyznacza się zredukowane współczynniki wyoboczeniowe χ_{f_i} zgodnie z ich gatunkiem stali i smukłością względną $\bar{\lambda}$ w temperaturze normalnej (20 °C). Na podstawie nomogramów z rysunków 1 i 2 można określić czas potrzebny na osiągnięcie temperatury krytycznej i oszacować nośność elementu w warunkach pożaru.

Tabela 1. Graniczne naprężenia ściskające $f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$ dla stali S235 [4]

S235	Temperatura stali $\theta_{a,t}$ [°C]								
	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$\bar{\lambda}$	$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$ [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

Tabela 2. Zredukowane współczynniki wyoboczeniowe χ_{f_i} w funkcji smukłości względnej $\bar{\lambda}$ w temperaturze normalnej (20 °C) i gatunku stali [5]

$\bar{\lambda}$	Gatunek stali			$\bar{\lambda}$	Gatunek stali		
	S235	S275	S355		S235	S275	S355
	χ_{f_i}				χ_{f_i}		
0,2	0,8480	0,8577	0,8725	1,6	0,1680	0,1714	0,1766
0,3	0,7767	0,7897	0,8096	1,7	0,1520	0,1549	0,1594
0,4	0,7054	0,7204	0,7439	1,8	0,1381	0,1406	0,1445
0,5	0,6341	0,6500	0,6752	1,9	0,1260	0,1282	0,1315
0,6	0,5643	0,5800	0,6050	2,0	0,1153	0,1172	0,1202
0,7	0,4983	0,5127	0,5361	2,1	0,1060	0,1076	0,1102
0,8	0,4378	0,4506	0,4713	2,2	0,0977	0,0991	0,1014
0,9	0,3841	0,3951	0,4128	2,3	0,0903	0,0916	0,0936
1,0	0,3373	0,3466	0,3614	2,4	0,0837	0,0849	0,0866
1,1	0,2970	0,3048	0,3172	2,5	0,0778	0,0788	0,0804
1,2	0,2626	0,2691	0,2794	2,6	0,0725	0,0734	0,0749
1,3	0,2332	0,2387	0,2473	2,7	0,0677	0,0686	0,0699
1,4	0,2081	0,2127	0,2200	2,8	0,0634	0,0642	0,0653
1,5	0,1865	0,1905	0,1966	2,9	0,0595	0,0602	0,0612

Literatura

[1] Biegus A., Mądry D.: Praktyczne aspekty projektowania konstrukcji stalowych z uwagi na warunki pożarowe. Inżynieria i Budownictwo nr 10/2013.
 [2] PN-EN 1993-1-2:2007 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-2: Reguły ogólne – Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe.
 [3] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
 [4] Steel-Access www.steel-access.com.
 [5] Konstrukcje stalowe w Europie. Jednokondygnacyjne konstrukcje stalowe. Część 7: Inżynieria pożarowa. www.arcelormittal.com.