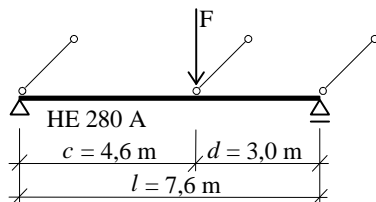


Przykład: Projektowanie pożarowe osłoniętej niestężonej belki stalowej o przekroju HEA według standardowej krzywej temperatura-czas

Przykład ilustruje sposób projektowania na warunki pożarowe stalowej belki swobodnie podpartej z częściowym stężeniem bocznym. Przepływ ciepła do kształtownika obliczono za pomocą równania podanego w PN-EN 1993-1-2, rozwiązywanego z użyciem procedury przyrostowej. Nośność obliczeniową wyznaczono za pomocą prostego modelu obliczeniowego belek narażonych na zwichrzenie podanego w PN-EN 1993-1-2.

Gorąco walcowany kształtownik HEA obciążony siłą skupioną stanowi fragment konstrukcji stropu budynku biurowego. Belka jest stężona na końcach i w punkcie przyłożenia obciążenia. Wymagane jest uzyskanie przez belkę odporności ogniowej R30, zakłada się że będzie zabezpieczona przed pożarem natryskiem wermikulitowym.



Rys. 1 Schemat statyczny

Dane podstawowe

Właściwości materiałowe

Gatunek stali: S 235

Granica plastyczności: $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

Gęstość: $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$

Obciążenia

Oddziaływania stałe:

$$G_k = 35 \text{ kN}$$

Oddziaływania zmienne:

$$Q_k = 43 \text{ kN}$$

Współczynniki częściowe

$$\gamma_G = 1,35$$

$$\gamma_Q = 1,50$$

$$\gamma_{M0} = 1,00$$

$$\gamma_{M,fi} = 1,00$$

Dane do obliczeń pożarowych

[SD005](#)

Właściwości materiału zabezpieczającego – natrysk cementowo-wermikulitowy

grubość $d_p = 10$ mm

gęstość $\rho_p = 550$ kgm⁻³

ciepło właściwe $c_p = 1100$ Jkg⁻¹K⁻¹

przewodność cieplna $\lambda_p = 0,12$ Wm⁻¹K⁻¹

Oddziaływania mechaniczne w temperaturze normalnej

EN 1991-1-1

Wartość charakterystyczna obciążenia:

$$P_k = G_k + Q_k = 35 + 43 = 78,0 \text{ kN}$$

Wartość obliczeniowa obciążenia:

$$F_{P_d} = G_k \gamma_G + Q_k \gamma_Q = 35 \cdot 1,35 + 43 \cdot 1,5 = 111,7 \text{ kN}$$

Moment zginający i siła poprzeczna:

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed} \cdot c \cdot d}{l} = \frac{111,7 \cdot 4,6 \cdot 3,0}{7,6} = 202,8 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = F_{Ed} \frac{c}{l} = 111,7 \cdot \frac{4,6}{7,6} = 67,6 \text{ kN}$$

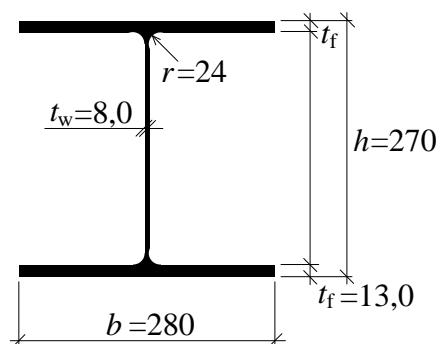
Sprawdzenie nośności w temperaturze normalnej

Przyjęto kształtownik HE 280 A.

[EN 1993-1-1](#)

Spełnia on warunki przekroju klasy 1.

[§5.5](#)



Rys. 2 Przekrój poprzeczny

Przekrój jest sprawdzany w stanie granicznym nośności Podparcie boczne jest [EN 1993-1-1 §6.3.2](#) usytuowane w punkcie przyłożenia obciążenia i w podporach, patrz Rys. 1. Wpływ zwichrzenia jest najniekorzystniejszy w lewej części belki, gdzie odległość pomiędzy podparciami bocznymi wynosi 4,6 m.

Przyjęto następujące warunki brzegowe: swoboda obrotu w płaszczyźnie poziomej ($k = 1$) i swoboda odkształceń nad podporami przy wyboczeniu skrętnym ($k_w = 1$):

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(kL)^2} \sqrt{\frac{I_w}{I_z} \left(\frac{k}{k_w}\right)^2 + \frac{(kL)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z}} \quad \text{SN003}$$

Stąd $L = c = 4,6$ m i $C_1 = 1,77$

$$M_{cr} = 1,77 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210\,000 \cdot 4763 \cdot 10^4}{(1 \cdot 4\,600)^2} \times \sqrt{\frac{0,7854 \cdot 10^{12}}{4763 \cdot 10^4} \left(\frac{1}{1}\right)^2 + \frac{(1 \cdot 4\,600)^2 \cdot 80\,700 \cdot 635,0 \cdot 10^3}{\pi^2 \cdot 210\,000 \cdot 4763 \cdot 10^4}}$$

$$= 1362,7 \text{ kNm}$$

Smukłość względna:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1112 \cdot 10^3 \cdot 235}{1362,7 \cdot 10^6}} = 0,438$$

Wartość współczynnika zwichrzenia dla gorąco walcowanego przekroju dwuteowego o stosunku $h/b < 2$ oblicza się przyjmując krzywą a (parametr imperfekcji $\alpha_{LT} = 0,21$). [EN 1993-1-1 §6.3.2.2](#)

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) = 0,5 \cdot \left(1 + 0,21 \cdot (0,438 - 0,2) + 0,438^2 \right) = 0,621$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,621 + \sqrt{0,621^2 - 0,438^2}} = 0,931$$

Nośność przekroju przy zginaniu wynosi:

$$M_{pl,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} = 0,931 \frac{1112 \cdot 10^3 \cdot 235}{1,0} = 243,3 \text{ kNm} > 202,8 \text{ kNm} = M_{Sd} \quad \text{OK} \quad \text{EN 1993-1-1 §6.3.2.1}$$

Nośność na ścinanie:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_{v,z} f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{3174 \cdot 235}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 430,6 \text{ kN} > 67,6 \text{ kN} = V_{Sd} \quad \text{OK} \quad \text{EN 1993-1-1 §6.2.6}$$

Przekrój jest sprawdzany w stanie granicznym użyteczności przy przyjęciu ugięcia granicznego $l / 250$ (poniższy wzór jest właściwy gdy $c > d$):

$$\delta = \frac{P_k d (3l^2 - 4d^2)}{48 E I_y} = \frac{78,0 \cdot 3000 \cdot (3 \cdot 7600^2 - 4 \cdot 3000^2)}{48 \cdot 210000 \cdot 136,7 \cdot 10^6} = \text{OK}$$

$$= 23,3 \text{ mm} < 30,4 \text{ mm} = \frac{l}{250}$$

(Ugięcia graniczne podane są w załącznikach krajowych lub innych przepisach krajowych. Przyjęta wartość jest wartością typową)

Przekrój belki spełnia warunki stanów granicznych w temperaturze normalnej.

Sprawdzenie nośności w warunkach pożaru

Oddziaływania mechaniczne w warunkach pożaru

Stosując sposób uproszczony według PN-EN 1991-2, oddziaływania w sytuacji pożarowej mogą być określone na podstawie oddziaływań w temperaturze normalnej.

[EN1991-1-2](#)
[§4.3.2](#)

Użyto kombinacji wyjątkowej do określenia oddziaływań mechanicznych podczas pożaru. Współczynnik ψ przyjęto równy $\psi_{2,1} = 0,3$, jak dla budynków biurowych. Współczynnik redukcyjny do obciążeń obliczeniowych w sytuacji pożarowej obliczono jako:

$$\eta_{fi} = \frac{g_k + \psi q_k}{g_k \gamma_G + q_k \gamma_Q} = \frac{35 + 0,3 \cdot 43}{35 \cdot 1,35 + 43 \cdot 1,5} = 0,429$$

[EN1993-1-2](#)
[§2.4.2](#)

Moment zginający i siła poprzeczna:

$$M_{fi,Ed} = \eta_{fi} M_{Ed} = 0,429 \cdot 202,8 = 87,0 \text{ kNm}$$

$$V_{fi,Ed} = \eta_{fi} V_{Ed} = 0,429 \cdot 67,6 = 29,0 \text{ kN}$$

Obliczenie temperatury gazu

Do obliczeń zastosowano standardową krzywą temperatura-czas.

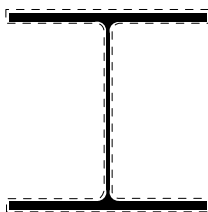
$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$$

[EN1991-1-2](#)
[§3.2.1](#)

Obliczenie temperatury belki

Wskaźnik ekspozycji przekroju można obliczyć następująco (patrz Rys.3, gdzie linią przerywaną zaznaczono obwód przekroju narażony na oddziaływanie pożaru):

$$\frac{A_p}{V} = \frac{4b + 2(h - t_w - 4r) + 2\pi r}{A} = \frac{4 \cdot 280 + 2 \cdot (270 - 8,0 - 4 \cdot 24) + 2 \cdot \pi \cdot 24}{9726} = 0,165 \text{ mm}^{-1} = 165 \text{ m}^{-1}$$



Rys. 3 Obliczanie wskaźnika ekspozycji przekroju A_p/V

Zmiana temperatury kształtownika stalowego jest obliczona za pomocą procedury przyrostowej, wykorzystując równanie:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p c_a \rho_a} \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{(1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad \text{but} \quad \Delta\theta_{a,t} \geq 0$$

[EN 1993-1-2](#)
[§4.2.5.2](#)

gdzie

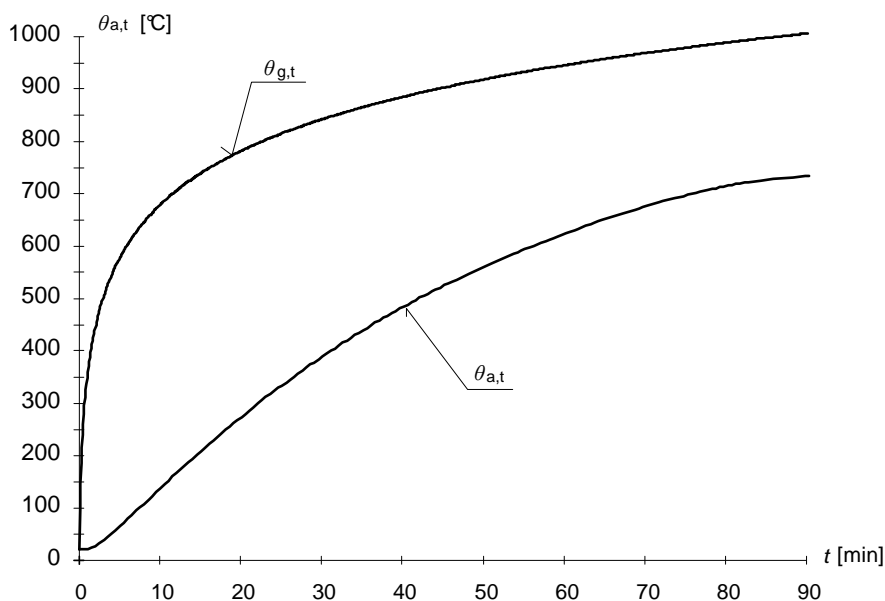
$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V}$$

Do obliczenia temperatury użyto kroku przyrostu czasowego $\Delta t = 30 \text{ s}$.

Obliczone wartości temperatury stali i gazu pokazano na Rys.4 i w Table1.

Table 1: Obliczenia temperatury stali

min	sec	t min	θ_g °C	c_a Jkg ⁻¹ °C ⁻¹	ϕ	$\Delta\theta_{a,t}$ °C	$\theta_{a,t}$ °C
	0	0	20,0	440			20,0
	30	0,500	261,1	440	0,289	0,0	20,0
1	00	1,000	349,2	440	0,289	0,0	20,0
1	30	1,500	404,3	440	0,289	2,6	22,6
2	00	2,000	444,5	442	0,288	4,4	26,9
2	30	2,500	476,2	454	0,286	5,3	32,3
3	00	3,000	502,3	448	0,284	5,9	38,2
27	30	27,500	828,8	587	0,217	5,6	369,4
28	00	28,000	831,5	590	0,216	5,5	374,8
28	30	28,500	834,1	592	0,215	5,5	380,2
29	00	29,000	836,7	594	0,214	5,4	385,5
29	30	29,500	839,3	597	0,213	5,3	390,7
30	00	30,000	841,8	599	0,212	5,3	396,0
30	30	30,500	844,3	602	0,211	5,2	401,1



Rys. 4 Krzywe temperatura-czas stali i gazu

Temperatura stali po czasie $t = 30$ minut wynosi $\theta_a = 396^\circ\text{C}$.

Uwaga:

Temperatura belki stalowej może zostać obliczona według opracowania SD005. Biorąc pod uwagę wskaźnik ekspozycji przekroju $A_p/V = 165 \text{ m}^{-1}$ i właściwości materiału zabezpieczającego przed pożarem

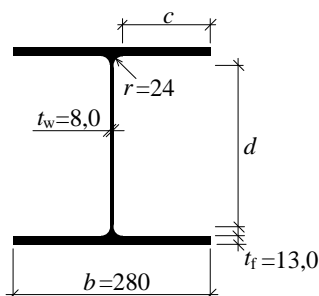
[SD005](#)

$$\frac{A_p}{V} \frac{\lambda_p}{d_p} = 165 \cdot \frac{0,1}{0,01} = 1650 \text{ WK}^{-1} \text{ m}^{-3}$$

Po czasie $t = 30$ minut temperatura wynosi $\theta_a = 396^\circ\text{C}$

Weryfikacja w dziedzinie nośności

Klasyfikacja przekroju w podwyższonej temperaturze



Rys. 5 Klasyfikacja przekroju poprzecznego

Smukłość pasa ściskanego wynosi:

$$\frac{c}{t_f} = \frac{112}{13,0} = 8,6$$

Wartość graniczna smukłości dla klasy 2 wynosi 10ε. W przypadku sytuacji pożarowej wartość współczynnika ε przyjmowana jest jako 0,85 wartości w normalnej sytuacji projektowej. Zatem smukłość graniczna w przypadku stali S235 wynosi:

$$0,85 \cdot 10 \varepsilon = 0,85 \cdot 10 \cdot 1,000 = 8,5$$

Tak więc wartość graniczna jest przekroczona. Wartość graniczna dla klasy 3 wynosząca:

$$0,85 \cdot 14 \varepsilon = 0,85 \cdot 14 \cdot 1,000 = 11,9$$

nie jest przekroczona, dlatego pólka ma klasę 3.

Smukłość środka zginanego wynosi

$$\frac{d}{t_w} = \frac{196,0}{8,0} = 24,5$$

a wartość graniczna smukłości dla klasy 1 wynosząca:

$$0,85 \cdot 72 \varepsilon = 0,85 \cdot 72 \cdot 1,000 = 61,2$$

nie jest przekroczona, dlatego środek ma klasę 1.

Kształtownik spełnia więc w podwyższonej temperaturze wymagania przekroju klasy 3.

Współczynniki redukcyjne $k_{y,\theta}$ i $k_{E,\theta}$ przy temperaturze $\theta_a = 396^\circ\text{C}$ wynoszą:

$$k_{y,\theta} = 1,000$$

$$k_{E,\theta} = 0,704$$

[EN 1993-1-2](#)

[§3.2.1](#)

[SD003](#)

Smukłość graniczna przy zwichrzeniu kształtowników walcowanych wynosi:

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0,438 \cdot \sqrt{\frac{1,000}{0,704}} = 0,522$$

Współczynnik α równy jest

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,65 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}} = 0,65$$

[EN 1993-1-2](#)
[§4.2.3.3\(5\)](#)

a współczynnik zwiczerzenia w pożarowej sytuacji projektowej wynosi

$$\phi_{LT,\theta} = 0,5 \left(1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta} + \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2 \right) = 0,5 \cdot \left(1 + 0,65 \cdot 0,522 + 0,522^2 \right) = 0,806$$

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{\phi_{LT,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2}} = \frac{1}{0,806 + \sqrt{0,806^2 - 0,522^2}} = 0,704$$

Nośność obliczeniowa przekroju na zginanie w temperaturze $\theta_a = 396^\circ\text{C}$ jest obliczana według:

[EN1993-1-2](#)
[§4.2.3.4](#)

$$M_{fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} \frac{W_{el,y} k_{y,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0,704 \cdot \frac{1013 \cdot 10^3 \cdot 1,000 \cdot 235}{1,0}$$

$$= 167,6 \text{ kNm} > 87,0 \text{ kNm} = M_{fi,Ed} \text{ OK}$$

Nośność obliczeniowa przekroju na ścinanie wynosi:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \frac{A_{v,z} f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M,fi}} = 1,000 \cdot \frac{3174 \cdot 235}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 430,6 \text{ kN} > 29,0 \text{ kN} = V_{fi,Sd} \text{ OK}$$

Przekrój spełnia warunki wymagane w sytuacji pożarowej.

Porównanie z projektowaniem pożarowym na działanie standardowego pożaru

W przypadku 30-to minutowego narażenia na działanie pożaru według krzywej standardowej, wymagana grubość osłony może zostać określona za pomocą tablic do projektowania natrysków wermikulitowych, opublikowanych w książce „Fire protection for structural steel in buildings”. Tablice te sporządzono przy założeniu, że temperatura krytyczna jest nie niższa niż 550°C.

Wskaźnik ekspozycji = 165 m⁻¹

Grubość warstwy zabezpieczającej = 10 mm

(10 mm to minimalna grubość zalecana przez producenta)

Porównanie metod

Metoda obliczeń	Stopień wykorzystania nośności, μ_0	Jednostkowy wskaźnik pożarowy
Parametryczna krzywa pożarowa i uproszczony model obliczeniowy według PN-EN 1993-1-2	$\frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} = \frac{87,0}{167,6} = 0.52$	$\frac{M_{fi,Ed}}{M_{fi,t,Rd}} = 0.52$
Dane producenta	0.6 (nominalnie)	1.0 (nominalnie)

Producent nie zaleca stosowania grubości mniejszej niż 10 mm, by zapewnić integralność zabezpieczenia w razie pożaru. W tym przykładzie wartość ta jest większa niż wymagana dla uzyskania wystarczającej izolacyjności.

Protokół jakości

TYTUŁ ZASOBU	Przykład: Projektowanie pożarowe osłoniętej niestężonej belki stalowej o przekroju HEA według standardowej krzywej temperatura-czas		
Odniesienie			
DOKUMENT ORYGINALNY			
	Imię i nazwisko	Instytucja	Data
Stworzony przez	Z. Sokol	CTU Prague	
Zawartość techniczna sprawdzona przez	F. Wald	CTU Prague	
Zawartość redakcyjna sprawdzona przez			
Zawartość techniczna zaaprobowana przez:			
1. WIELKA BRYTANIA	G W Owens	SCI	30/6/08
2. Francja	A Bureau	CTICM	30/6/08
3. Szwecja	B Uppfeldt	SBI	30/6/08
4. Niemcy	C Müller	RWTH	30/6/08
5. Hiszpania	J Chica	Labein	30/6/08
6. Luksemburg	M Haller	PARE	30/6/08
Zasób zatwierdzony przez Koordynatora Technicznego	G W Owens	SCI	18/9/06

Informacje ramowe

Tytuł*	Przykład: Projektowanie pożarowe osłoniętej niestężonej belki stalowej o przekroju HEA według standardowej krzywej temperatura-czas	
Seria		
Opis*	Przykład ilustruje sposób projektowania na warunki pożarowe stalowej belki swobodnie podpartej z częściowym stężeniem bocznym. Przepływ ciepła do kształownika obliczono za pomocą równania podanego w PN-EN 1993-1-2, rozwiązywanego z użyciem procedury przyrostowej. Nośność obliczeniową wyznaczono za pomocą prostego modelu obliczeniowego belek narażonych na zwichrzenie podanego w PN-EN 1993-1-2.	
Poziom dostępu*	Umiejętności specjalistyczne	
Identyfikator*	Nazwa pliku	D:\ACCESS_STEEL_PL\SX\SX048a-PL-EU.doc
Format		Microsoft Word 9.0; 13 Pages; 355kb;
Kategoria*	Typ zasobu	Przykład obliczeniowy
	Punkt widzenia	
Temat*	Obszar stosowania	Projektowanie z uwagi na bezpieczeństwo pożarowe
Daty	Data utworzenia	22/08/2009
	Data ostatniej modyfikacji	
	Data sprawdzenia	
	Ważny od	
	Ważny do	
Język(i)*		
Kontakt	Autor	Z. Sokol, CTU Prague
	Sprawdził	F. Wald, CTU Prague
	Zatwierdził	
	Redaktor	
	Ostatnia modyfikacja	
Słowa kluczowe*	Nośność pożarowa elementów; Projektowanie metodą stanów granicznych; Eurokody; Słupy; Belki	
Zobacz też	Odniesienie do Eurokodu	EN 1991, EN 1993-1-1, EN 1993-1-2
	Przykład(y) obliczeniowy	
	Komentarz	
	Dyskusja	
	Inne	
Obszar stosowania	Przydatność krajowa	Europe

Instrukcje szczególne	
--------------------------	--