

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

Zapewnienie bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji stalowych w warunkach pożaru najczęściej uzyskuje się, stosując izolację termiczną. Oślania 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 żadnej analizy obliczeniowej oceniającej zachowanie się konstrukcji stalowej w warunkach pożaru. Stąd rezultat takiego postępowania nie zawsze jest wiarygodny [4].

**P**rojektowanie tradycyjne konstrukcji stalowych na warunki pożarowe jest w wielu przypadkach zbyt zachowawcze. Stosowanie kosztownej izolacji ogniochronnej konstrukcji stalowej nie zawsze jest niezbędne. Postęp wiedzy w dziedzinie inżynierii pożarowej, dostępne programy komputerowe, a także uproszczone sposoby oceny bezpieczeństwa konstrukcji stalowych w warunkach pożaru wg PN-EN 1993-1-2 [9] (omówione m.in. w [1], [3], [6]) umożliwiają często odstąpienie od stosowania izolacji ogniochronnej lub zmniejszenie jej grubości. W pracy podano ułatwienia obliczeń oceny ognioodporności konstrukcji stalowych z zastosowaniem prostych modeli metody nośności oraz metody temperatury krytycznej, z wykorzystaniem tzw. euronomogramów. Przedstawiono sposób identyfikacji temperatury elementów stalowych z pominięciem uciążliwych,

przyrostowych obliczeń zaproponowanych w PN-EN 1993-1-2 [9]. Omówiono uproszczone algorytmy oszacowania nośności prętów stalowych z warunku utraty stateczności ogólnej, które skracają iteracyjny sposób tych obliczeń przedstawiony w PN-EN 1993-1-2 [9].

## Analiza termiczna elementów stalowych bez izolacji i z izolacją ogniochronną

W celu identyfikacji temperatury oraz stopnia wyężenia elementu stalowego w rozważanym czasie  $t$  trwania pożaru wykonuje się analizę termiczną. Jej celem jest określenie zależności między temperaturą stalowego elementu  $\theta_{a,t}$  i czasem  $t$  osiągnięcia tej temperatury, zarówno w przypadku elementów nieosłoniętych, jak i elementów osłoniętych izolacją ogniochronną.

Wskaźnik ekspozycji przekroju (nazywany też wskaźnikiem masywności

przekroju)  $A_m/V$  jest miarą szybkości nagrzewania się stalowego elementu nieosłoniętego, narażonego na oddziaływanie wysokiej temperatury w warunkach pożaru. Ponadto w ocenie ilości ciepła przejmowanego przez element stalowy uwzględnia się współczynnik poprawkowy  $k_{sb}$ , związany z efektem zacienienia. Uwzględnia on przesłanianie strumienia ciepła w elementach o wklęsłym obrysie przekroju poprzecznego, tzw. efekt cienia. Współczynnik  $k_{sb}$  jest ilorazem umownego przekroju skrzynkowego opisanego na przekroju rzeczywistym  $[A_m/V]_b$  i wskaźnika ekspozycji przekrojów bez izolacji  $A_m/V$ , bez izolacji z uwzględnieniem współczynnika cienia  $[A_m/V]_{sb}$ , podano w PN-EN 1993-1-2 [9], a także pokazano na rys. 1 i 2.

Aby wydłużyć czas dochodzenia w warunkach pożaru do temperatury krytycz-

nej konstrukcji stalowej, czyli zwiększenia jej odporności ogniowej, stosuje się m.in. bierną ochronę przeciwpożarową (osłony ognioizolacyjne). W przypadku elementu osłoniętego wskaźnik ekspozycji przekroju przyjmuje się jako parametr  $A_p/V$ . Zasady ustalania wskaźników ekspozycji przekrojów kształtowników stalowych  $A_p/V$  podano w PN-EN 1993-1-2 [9], a także na rys. 3.

Intensywność nagrzewania niezabezpieczonych elementów stalowych można wyznaczyć metodą analityczną przedstawioną w PN-EN 1993-1-2 [9], w której wzrost temperatury zależy od oddziaływań termicznych (które są wyrażone w postaci strumienia ciepła netto), właściwości termicznych stali oraz wskaźnika ekspozycji. W PN-EN 1993-1-2 [9] podano też metodę obliczeniową oceny nagrzewania się stalowych elementów izolowanych materiałami biernej ochrony przeciwpożarowej. Ich wzrost temperatury zależy od wskaźnika ekspozycji przekroju stalowego elementu izolowanego  $A_p/V$ , grubości warstwy izolacji ogniochronnej  $d_p$ , [m] oraz jej przewodności cieplnej  $\lambda_p$  [W/(mK)], które wyra-

ża wskaźnik izolacyjności przekroju  $k_p$ , [W/m<sup>3</sup>K] określony wzorem:

$$k_p = \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \quad (1)$$

Nagrzewanie elementów stalowych bez izolacji i z izolacją ogniochronną  $\theta_{a,t}(t)$  wyznacza się przyrostową metodą analityczną. W celu pominięcia uciążliwych przyrostowych obliczeń temperatur stali  $\theta_{a,t}(t)$  zaproponowanych w PN-EN 1993-1-2 [9] można skorzystać z nomogramów pokazanych na rys. 4 i 5.

Na rys. 4 [10] podano nomogramy temperatur stali  $\theta_{a,t}$  w funkcji czasu  $t$  (obliczone z uwzględnieniem standardowej krzywej ekspozycji pożarowej) stalowych elementów bez izolacji ogniochronnej, przy ich różnych współczynnikach ekspozycji przekroju  $[A_m/V]_{sb}$  (z uwzględnieniem współczynnika cienia).

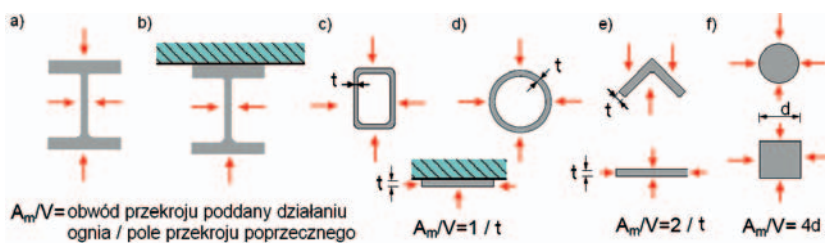
Na rys. 5 [11] podano nomogramy temperatur stali  $\theta_{a,t}$  w funkcji czasu  $t$  (obliczone z uwzględnieniem standardowej krzywej ekspozycji pożarowej) stalowych elementów osłoniętych izolacją ogniochronną, przy ich różnych wskaźnikach izolacyjności przekroju  $k_p$ .

## Proste metody oceny bezpieczeństwa konstrukcji stalowych w warunkach według PN-EN 1993-1-2

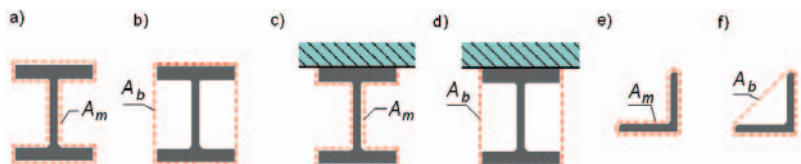
Gdy w warunkach pożaru temperatura gazu  $\theta_g$  wzrasta, to po czasie  $t$  temperatura elementu stalowego  $\theta_{a,t}$  zwiększa się, a jego nośność  $R_{f,t,d}$  maleje. Stalowe konstrukcje budowlane należy projektować w sposób, który zapewni im nośność  $R_{f,t,d}$  lub ograniczone odkształcenia, przez pewien czas  $t_{f,t,d,req}$ , w których są one narażone na oddziaływanie wysokiej temperatury, która występuje w trakcie pożaru. Wymagany przez przepisy przeciwpożarowe czas  $t_{f,t,d,req}$  charakteryzuje klasę odporności pożarowej budynku.

W PN-EN 1993-1-2 [9] zaproponowano proste modele obliczania nośności stalowych belek i słupów w warunkach pożaru, tj. metodę temperatury krytycznej oraz metodę nośności. Można je stosować w ocenie nośności stalowych elementów niezabezpieczonych i zabezpieczonych ogniochronnie oraz chronionych ekranami cieplnymi. W tych uproszczonych modelach obliczenio-

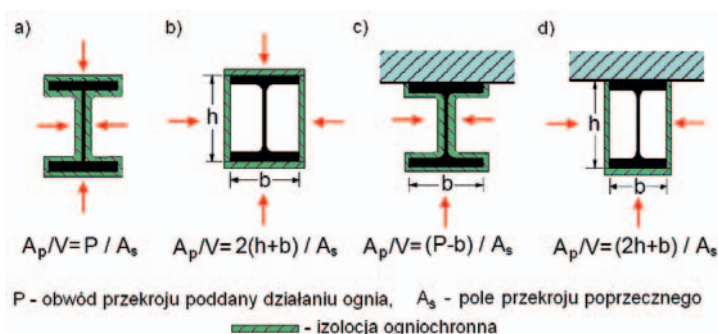
reklama



Rys. 1. Przykłady określania wskaźników ekspozycji przekrojów nieosłoniętych elementów stalowych



Rys. 2. Przykłady sposobu wyznaczania powierzchni  $A_m$  oraz  $A_b$  elementów stalowych



Rys. 3. Przykłady określania wskaźników ekspozycji osłoniętych elementów stalowych

Wych nie uwzględnia się sił wewnętrznych spowodowanych wymuszonymi lub ograniczonymi wydłużeniami, a także deformacjami elementów konstrukcji stalowej, które powstają w trakcie pożaru. Temperatura krytyczna stalowego elementu nośnego  $\theta_{a,cr}$ , przy danym poziomie jego wyężenia, jest to temperatura, przy której przyjmuje się, że następuje wyczerpanie jego nośności. Ognioodporność elementu stalowego jest zapewniona po czasie  $t$ , jeżeli temperatura stali  $\theta_{a,t}$  nie przekracza jej temperatury krytycznej  $\theta_{a,cr}$ . Stąd warunek bezpieczeństwa ogniowego elementu stalowego według metody temperatury krytycznej opisuje nierówność:

$$\theta_{a,t} \leq \theta_{a,cr} \quad (2)$$

W metodzie temperatury krytycznej na podstawie analizy termicznej należy wyznaczyć temperaturę elementu stalowego  $\theta_{a,t}$  po czasie  $t$  oraz obliczyć jego temperaturę krytyczną  $\theta_{a,cr}$  i sprawdzić nierówność (2).

Zgodnie z PN-EN 1993-1-2 [9] w ocenie bezpieczeństwa elementów stalowych w warunkach pożaru można również stosować metodę nośności. W analizie prostych modeli obliczeniowych ocenę odporności ogniowej konstrukcji stalowej metodą nośności sprawdza się ze wzoru:

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,t,d} \quad (3)$$

Klasa przekroju	Współczynnik przystosowania $K_f$ elementu		
	ekspozowanego z 4 stron, bez względu na osłonięcie	osłoniętego z 3 stron i stykającego się z płytą stropową zespólną lub żelbetową po stronie 4.	Nieosłoniętego i ekspozowanego z 3 stron i stykającego się z płytą stropową zespólną lub żelbetową po stronie 4.
1, 2	1,00	0,85	0,70
3 <sup>1)</sup>	1,00	0,85	0,70

<sup>1)</sup> –  $\theta_{a,max}$  określone dla  $A_m/V$  przekroju ekspozowanego z 4 stron

Tab. 1. Współczynniki  $K_f$  elementu o nierównomiernym rozkładzie temperatury w przekroju [9]

Klasa przekroju	Współczynnik przystosowania $K_f$ elementu	
	na podporach elementów statycznie niewyznaczalnych <sup>2)</sup>	w elementach statycznie wyznaczalnych i w przęsłach elementów statycznie niewyznaczalnych
1, 2	0,85	1,00
3 <sup>1)</sup>	0,85	1,00

<sup>1)</sup> –  $\theta_{a,max}$  określone dla  $A_m/V$  przekroju ekspozowanego z 4 stron  
<sup>2)</sup> – dotyczy też podpór belek wspornikowych i podpór przęseł sąsiadujących z przewieszeniem

Tab. 2. Współczynniki  $K_f$  elementu o nierównomiernym rozkładzie temperatury na jego długości [9]

gdzie:

$E_{f,d}$  – obliczeniowy efekt oddziaływań w sytuacji pożarowej wyznaczony zgodnie z PN-EN 1991-1-2 [7],

$R_{f,d}$  – obliczeniowa nośność stalowego elementu po czasie  $t$ , obliczona według PN-EN 1993-1-2 [9].

Obliczeniowe nośności elementów stalowych w warunkach pożaru  $R_{f,d}$  określa się, modyfikując odpowiednie ich nośności określone w normalnej temperaturze według postanowień PN-EN 1993-1-1 [8]. Metodę nośności można stosować w ocenie wytrzymałości w warunkach pożaru elementów rozciąganych, ściskanych lub/i zginanych. Przykłady obliczeń nośności konstrukcji stalowych w warunkach pożaru tą metodą przedstawiono m.in. w [6].

W ramach badań naukowych prowadzonych przez Europejską Konwencję Konstrukcji Stalowych (ECSC) opracowano tzw. euronomogramy [10]÷[14], ułatwiające obliczenia stalowych konstrukcji w warunkach pożaru według metody nośności i metody temperatury krytycznej. Zaproponowane w [10]÷[15] procedury obliczeniowe są szczególnie

przydatne w przypadku analizy nośności z warunku utraty stateczności ogólnej elementów stalowych (nośności na wyboczenie oraz nośności na zwichrzenie).

### **Ocena bezpieczeństwa pożarowego elementów stalowych metodą temperatury krytycznej na podstawie euronomogramów**

Ocena bezpieczeństwa pożarowego metodą temperatury krytycznej polega na wyznaczeniu temperatury  $\theta_{a,t}$  elementu stalowego po upływie wymaganego okresu ognioodporności  $t_{f,d,req}$  i porównaniu jej z temperaturą krytyczną  $\theta_{a,cr}$ , przy której wystąpiłoby wyczerpanie jego nośności, tj. sprawdzenie warunku (2). Ten prosty model obliczeniowy można stosować tylko wtedy, gdy nie trzeba uwzględniać w analizie wytrzymałościowej kryteriów stateczności, tj. w przypadku prętów: rozciąganych, zginanych zabezpieczonych przed zwichrzeniem oraz ściskanych, które nie ulegają wyboczeniu, ani też warunków odkształcenia elementu stalowego.

Temperatura krytyczna stalowego elementu o przekroju klasy 1, 2 lub 3 wynosi 500÷800°C. W przypadku kształ-

towników o przekrojach klasy 4 należy stosować zachowawczą temperaturę krytyczną, która wynosi 350°C.

Temperaturę krytyczną stalowego elementu o przekroju klasy 1, 2 lub 3 oblicza się (zakładając równomierny rozkład temperatury) ze wzoru:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[ \frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4)$$

w którym wskaźnik wykorzystania nośności elementu  $\mu_0$  wyznacza się z zależności:

$$\mu_0 = \frac{E_{f,d}}{R_{f,d,0}}, \quad (5)$$

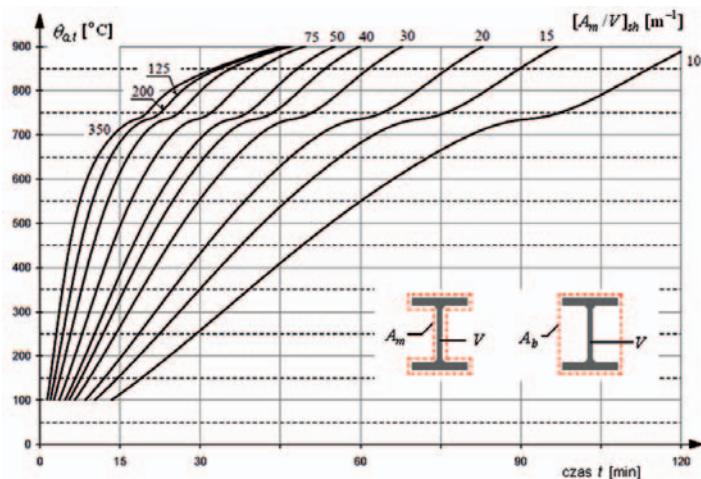
gdzie:

$R_{f,d,0}$  – nośność obliczeniowa elementu stalowego w obliczeniowej sytuacji pożarowej w czasie  $t = 0$ .

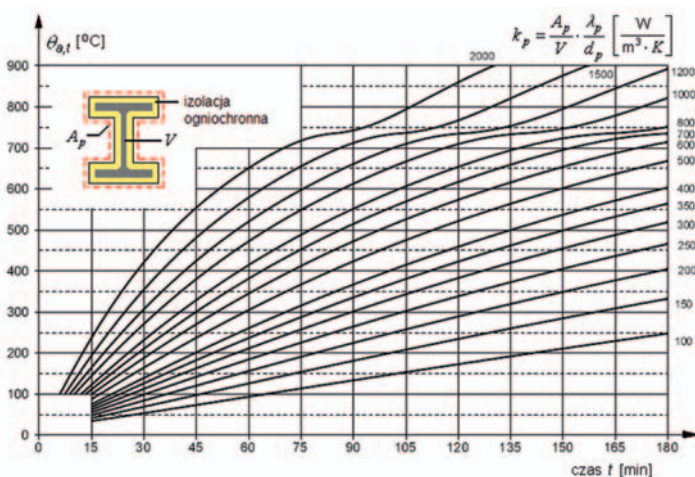
Temperatura krytyczna elementu stalowego (4) zmniejsza się wraz ze wzrostem wskaźnika wykorzystania nośności (5). Na rys. 6 [13] pokazano nomogramy temperatury krytycznej stalowych elementów  $\theta_{a,cr}$  w funkcji wskaźnika wykorzystania nośności  $\mu_0$ . Służą one do obliczania odporności ogniowej stalowych ►

reklama

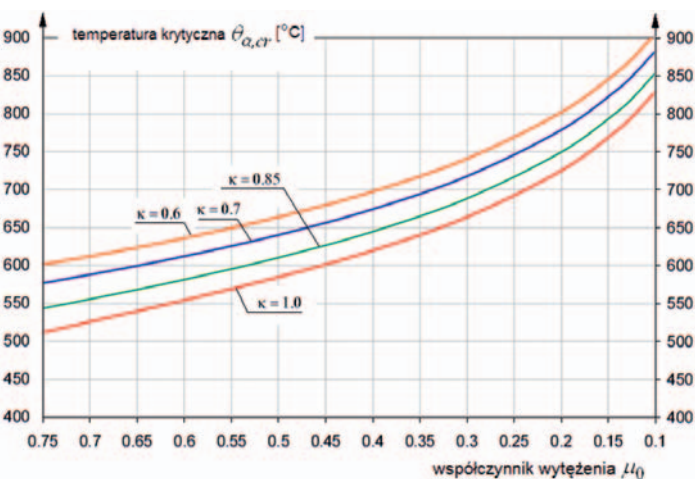




— Rys. 4. Nomogramy temperatur stali  $\theta_{a,t}$  w funkcji czasu  $t$  (obliczone z uwzględnieniem standardowej krzywej ekspozycji pożarowej) stalowych elementów bez izolacji ogniochronnej, przy ich różnych współczynnikach ekspozycji przekroju  $[A_m/V]_{sb}$ , z uwzględnieniem współczynnika cienia [10]



— Rys. 5. Nomogramy temperatur stali  $\theta_{a,t}$  w funkcji czasu  $t$ , (obliczone z uwzględnieniem standardowej krzywej ekspozycji pożarowej) stalowych elementów osłoniętych izolacją ogniochronną, przy ich różnych wskaźnikach izolacyjności przekroju  $k_p$  [11]



— Rys. 6. Nomogramy temperatury krytycznej stalowych elementów  $\theta_{a,cr}$  w funkcji wskaźnika wykorzystania jego nośności  $\mu_0$  [13]

► prętów rozciąganych i belek z uwzględnieniem współczynników przystosowania (adaptacji).

W PN-EN 1993-1-2 [9] podano uproszczone zasady oceny nośności na zginanie stalowych elementów o przekrojach klasy 1, 2 lub 3, o nierównomiernym rozkładzie temperatury w przekroju oraz na ich długości. W tym podejściu ich obliczeniową nośność na zginanie można obliczyć ze wzoru:

$$M_{fi,t,Rd} = \frac{M_{fi,\theta,Rd}}{\kappa_1 \kappa_2}, \quad (6)$$

gdzie:

$M_{fi,\theta,Rd}$  – obliczeniowa nośność przy zginaniu z równomierną temperaturą w przekroju  $\theta_{a,t}$  w czasie  $t$  trwania pożaru, według PN-EN 1993-1-2 [9],

$\kappa_1, \kappa_2$  – współczynniki przystosowania uwzględniające nierównomierny rozkład temperatury odpowiednio w przekroju i na długości elementu, które podano w tab. 1 i 2. Na rys. 6 [13] pokazano nomogramy temperatury krytycznej stalowych elementów zginanych zabezpieczonych przed zwichrzeniem oraz prętów rozciąganych w funkcji współczynników przystosowania i zmodyfikowanego współczynnika stopnia ich wyciężenia obliczonego ze wzoru:

$$\mu_0 = \kappa_1 \kappa_2 \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} = \kappa \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}. \quad (7)$$

Ocena bezpieczeństwa pożarowego elementów stalowych metodą temperatury krytycznej z użyciem euronomogramów [10], [11] [13] i tablic [16] jest stosunkowo prosta. Potrzebne do określenia temperatury  $\theta_{a,t}$  wartości wskaźników ekspozycji przekrojów  $[A_m/V]_{sb}$  oraz  $A_p/V$  kształtowników stalowych walcowanych na gorąco można określić, korzystając z tablic podanych na stronie internetowej [www.arcelormittal.com](http://www.arcelormittal.com) [16]. Temperaturę  $\theta_{a,t}$  stalowych elementów nieosłoniętych izolacją ogniochronną oraz osłoniętych izolacją ogniochronną, po czasie  $t$  trwania pożaru, można wyznaczyć z nomogramów na rys. 4 i 5 [10] i [11]. Następnie dla analizowanego czasu trwania pożaru  $t$ , przyjmując, że  $\theta_{a,t} = \theta_{a,cr}$ , można z nomogramów na rys. 6 [13] określić wartość maksymalną poziomu wykorzystania nośności  $\mu_0$  elementu stalowego, która zapewnia jego ognioodporność. □