

# Projektowanie hal stalowych z uwagi na warunki pożarowe – cz. III

## Ocena nośności konstrukcji stalowych w warunkach pożaru

W projektowaniu  
stalowych konstrukcji  
w warunkach pożaru  
stosuje się PN-EN  
1993-1-2 Eurokod 3:

*Projektowanie konstrukcji  
stalowych. Część 1-2:*

*Reguły ogólne –*

*Obliczanie konstrukcji  
w warunkach pożaru [9].*

**N**a rys. 1 przedstawiono ogólne zachowanie stalowego elementu konstrukcyjnego pod wpływem pożaru standardowego [7] oraz występujących oddziaływań. Z analizy pokazanych na rys. 1 zależności wynika, że gdy wzrasta temperatura gazu  $\theta_g$ , to również wzrasta temperatura elementu stalowego  $\theta_{a,t}$ , a jego nośność  $R_{f,d,t}$  maleje. Zgodnie z postanowieniami [9] konstrukcję stalową należy projektować w sposób, który pozwoli na zapewnienie jej nośności  $R_{f,d,t}$  (lub ograniczonego odkształcenia) przez pewien wymagany czas  $t_{f,d,reg}$ , w którym jest ona narażona na działanie wysokiej temperatury występującej w trakcie pożaru. Według [9] w analizie prostych modeli obliczeniowych ocenę odporności

ogniowej konstrukcji stalowych można sprawdzać ze wzoru

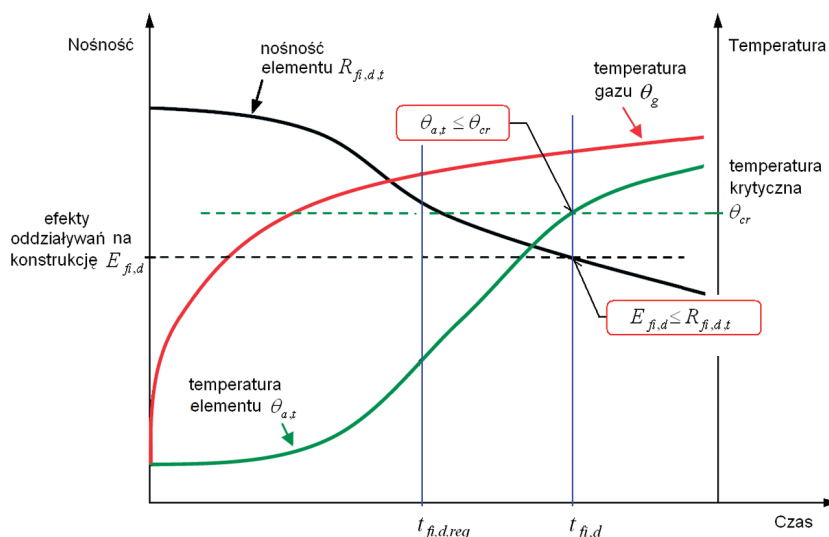
$$E_{f,d} \leq R_{f,d,t} \quad (1)$$

gdzie:

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

$R_{f,d,t}$  – obliczeniowa nośność elementu ( $M_{f,d,t}, N_{f,d,t}, V_{f,d,t}$ ) części lub całości konstrukcji po czasie  $t$ , wyznaczona zgodnie z PN-EN 1993-1-2 [9].

Temperatura krytyczna stalowego elementu  $\theta_{cr}$  (przy danym poziomie jego obciążenia i poddanemu równomiernemu rozkładowi oddziaływania temperatury) jest to temperatura, przy której przyjmuje się, że ulega on zniszczeniu.



Rys. 1. Zachowanie stalowego elementu konstrukcyjnego w sytuacji pożarowej [10]

Ognioodporność elementu stalowego (w którym nie występuje lokalna utrata stateczności ścianki przekroju) jest zapewniona po czasie  $t$ , jeżeli temperatura stali  $\theta_{a,t}$  nie przekracza jej temperatury krytycznej  $\theta_{cr}$ . Stąd warunek bezpieczeństwa ogniowego opisuje nierówność

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

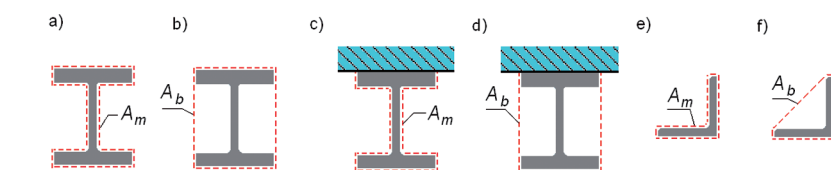
W podsumowaniu można stwierdzić, że zgodnie z PN-EN 1993-1-2 [9] wymagania bezpieczeństwa konstrukcji stalowej są zachowane (rys. 1), gdy w wymaganym czasie jej ognioodporności  $t_{f,d,reg}$  zachodzi jeden z następujących warunków:

- nośność elementu jest większa niż efekty oddziaływań; spełniony jest warunek (1),
- temperatura stali elementu jest niższa od temperatury krytycznej; spełniony jest warunek (2).

### Proste metody projektowania konstrukcji stalowych do warunków pożarowych

Podane w PN-EN 1993-1-2 [9] proste modele obliczania nośności stalowych belek i słupów w warunkach pożaru są kompatybilne z zasadami oceny nośności granicznych w warunkach normalnej temperatury według PN-EN 1993-1-1 [8]. Uwzględniają one zmniejszenie efektów oddziaływań na konstrukcję oraz degradację właściwości mechanicznych stali w podwyższonych temperaturach. Mogą one być stosowane w ocenie nośności stalowych elementów niezabezpieczonych i zabezpieczonych ogniochronnie oraz chronionych ekranami cieplnymi, wyteżonych rozciąganiem, ściskaniem lub/i zginaniem. Obliczeniowe wartości ich nośności określa się, zakładając równomierny rozkład temperatury w elemencie, modyfikując odpowiednie nośności elementów określone w normalnej temperaturze według zasad podanych w PN-EN 1993-1-1 [8].

Oddziaływanie wysokiej temperatury w czasie pożaru na konstrukcję jest traktowane w PN-EN 1990 [6] jako wyjątkowa sytuacja projektowa. W wypadku uproszczonej analizy termiczno-statyczno-wytrzymałościowej skutki oddziaływań w sytuacji pożarowej można określić, pomijając siły



Rys. 2. Przykłady sposobu wyznaczania powierzchni  $A_m$  oraz  $A_{m,b}$

wewnętrzne wywołane wymuszonymi lub ograniczonymi wydłużeniami lub deformacjami elementów, na podstawie wyników ustalonych przy projektowaniu w temperaturze normalnej.

Ze względu na małe prawdopodobieństwo jednoczesnego wystąpienia poważnego pożaru i pełnych oddziaływań zewnętrznych o normowych wartościach charakterystycznych (obciążen: użytkowych, klimatycznych, technologicznych itp.) efekty oddziaływań w warunkach pożaru określa się, redukując skutki oddziaływań zewnętrznych w trwałej i przejściowej sytuacji projektowej. Zredukowane efekty oddziaływań w warunkach pożaru  $E_{f,d}$  oblicza się ze wzoru

$$E_{f,d} = \eta_f E_d \quad (3)$$

gdzie:

$E_d$  – wartości obliczeniowe efektów oddziaływań obliczone dla kombinacji podstawowej według wzoru (6.10) w PN-EN 1990 [6],

$\eta_f$  – współczynnik redukcyjny z uwagi na warunki pożarowe, przyjmowany w kombinacji podstawowej (według wzoru (6.10) w PN-EN 1990 [6]), w przypadku trwałych lub przejściowych sytuacji obliczeniowych wyznacza się ze wzoru

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (4)$$

$G_k$  – wartość charakterystyczna oddziaływania stałego,

$Q_{k,1}$  – wartość charakterystyczna wiodącego oddziaływania zmiennego,

$\psi_{fi}$  – współczynnik do określenia wartości kombinacji obciążeń zmiennych odpowiednio częstych  $\psi_{1,1}$  i prawie stałych  $\psi_{1,2}$ , według PN-EN 1991-1-2 [7],

$\gamma_{Q,1}$  – współczynnik częściowy wiodącego obciążenia zmiennego.

W PN-EN 1993-1-2 [9] podano też informacje na temat wyznaczania współczynnika redukcyjnego  $\eta_f$  w przypadku

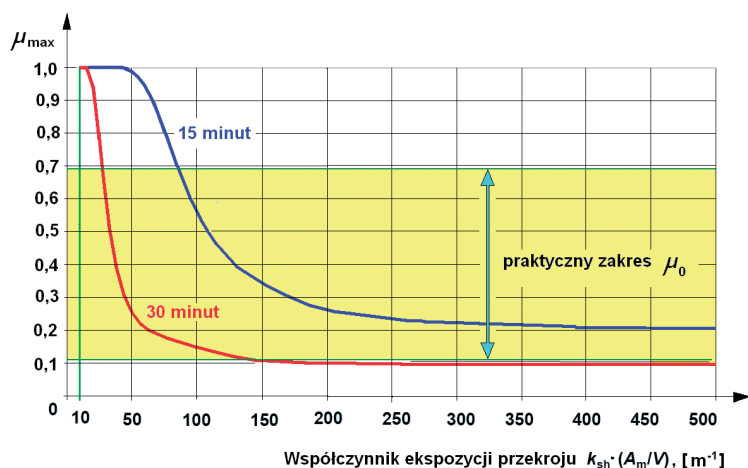
gdy korzysta się z kombinacji podstawowej według wzoru (6.10a) i (6.10b) w PN-EN 1990 [6].

### Metoda temperatury krytycznej

Podstawą metody temperatury krytycznej oceny bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji jest wyznaczenie temperatury elementu po upływie wymaganego okresu ognioodporności i porównanie jej z temperaturą krytyczną, przy której wystąpiłoby wyczerpanie jego nośności, tj. sprawdzenie warunku (2). Ten prosty model oceny bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji stalowej według metody temperatury krytycznej można stosować tylko wtedy, gdy nie trzeba stosować tylko wtedy, gdy nie trzeba uwzględniać kryteriów stateczności ani warunków odkształcenia. Metodę tę dopuszcza się tylko w przypadku elementów rozciąganych, elementów zginanych zabezpieczonych przed zwichrzeniem oraz krótkich elementów ściskanych, które nie ulegają wyboczeniu. Szybkość nagrzewania się elementu stalowego zależy od jego stosunku pola powierzchni nieosłoniętej  $A_m$  do objętości  $V$  na jednostkę jego długości. Wielkość  $A_m/V$  nazywa się wskaźnikiem ekspozycji przekroju (lub wskaźnikiem przekroju) jest miarą szybkości nagrzewania się stalowego elementu nieosłoniętego. W ocenie ilości ciepła przejmowanego przez nieosłonięty element stalowy narażony na oddziaływanie pożaru nominalnego uwzględnia się ponadto współczynnik poprawkowy  $k_{sh}$ , związany z efektem zacienienia. Uwzględnia on przesłanianie strumienia ciepła w elementach o wklęsłym obrysie przekroju poprzecznego, tzw. efekt cienia.

Współczynnik  $k_{sh}$  jest ilorazem umownego przekroju skrzynkowego opisanego na przekroju rzeczywistym  $[A_m/V]_b$  i wskaźnika ekspozycji  $A_m/V$  i wynosi:

$$k_{sh} = \frac{[A_m/V]_b}{[A_m/V]} \quad (5)$$



— Rys. 3. Maksymalny poziom wykorzystania nośności stalowego elementu nieosłoniętego w funkcji współczynnika przekroju  $k_{sh} \cdot (A_m/V)$  [10]

► – inne przekroje, np. teowy, kątowy:

$$k_{sh} = \frac{[A_m/V]_b}{[A_m/V]} \quad (6)$$

Powierzchnię  $A_{m,b}$  mierzy się po wypukłym obrysie przekroju poprzecznego (rys. 2), nie zaś po rzeczywistym jego obwodzie, jak w przypadku powierzchni  $A_m$ . W odniesieniu do stalowego elementu osłoniętego wskaźnik przekroju przyjmuje się jako parametr  $A_p/V$  i jest to iloraz powierzchni ekspozycyjnej osłony ogniochronnej  $A_p$  do objętości  $V$  na jednostkę jego długości.

Temperatura krytyczna stalowego elementu konstrukcyjnego  $\theta_{cr}$  (przy danym poziomie jego obciążenia i poddanego równomiernemu rozkładowi oddziaływania temperatury) jest to temperatura, przy której następuje ujawnienie się stanu granicznego. Oblicza się ją ze wzoru

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left[ \frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482, \quad ^\circ\text{C} \quad (7)$$

w którym wskaźnik wykorzystania jego nośności wyznacza się z zależności

$$\mu_0 = \frac{E_{f,d}}{R_{f,d,0}} \quad (8)$$

gdzie:

$E_{f,d}$  – efekt oddziaływań na konstrukcję wyznaczony zgodnie z regułami wyjątkowej, obliczeniowej sytuacji pożarowej wg PN-EN 1991-1-2 [7],

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

Temperatura krytyczna elementów stalowych na ogół wynosi  $\theta_{cr} = 500 \div 800^\circ\text{C}$ . Wyrażenie (7) określające temperaturę krytyczną  $\theta_{cr}$  można stosować w przypadku elementów o przekrojach klasy 1, 2 lub 3. W przypadku kształtowników o przekrojach klasy 4 należy stosować zachowawczą temperaturę krytyczną  $\theta_{cr} = 350^\circ\text{C}$ .

Temperatura krytyczna elementu zmniejsza się wraz ze wzrostem wskaźnika wykorzystania jego nośności  $\mu_0$ . Dla danego czasu trwania pożaru  $t$ , przyjmując, że  $\theta_{a,t} = \theta_{cr}$ , wartość maksymalną poziomu wykorzystania nośności  $\mu_0$  niezabezpieczonych elementów stalowych, zapewniającą ognioodporność, można obliczyć z zależności (7) jako funkcję współczynnika przekroju uwzględniającego efekt cienia  $k_{sh} \cdot (A_m/V)$ . W ten sposób można przyjąć, że ognioodporność niezabezpieczonych elementów stalowych jest zapewniona po czasie  $t$ , jeżeli  $\mu_0 \leq \mu_{max}$ . Maksymalne wskaźniki wykorzystania nośności  $\mu_{max}$ , obliczone dla ogniood-

porności R 15 i R 30, podano na rys. 3. Należy zauważyć, że w przypadku ognioodporności R 30 elementy niezabezpieczone o współczynniku przekroju  $(A_m/V)_{sb}$  większym niż  $50 \text{ m}^{-1}$  mogą osiągać tylko bardzo małe wartości wskaźnika wykorzystania nośności elementu  $\mu_0$ .

## Analiza termiczna elementów stalowych bez izolacji ogniochronnej

Celem analizy termicznej jest określenie zależności między temperaturą w elemencie i czasem osiągnięcia tej temperatury (zarówno w przypadku elementów nieosłoniętych, jak i osłoniętych izolacją ogniochronną). Identyfikując temperaturę w elemencie stalowym w rozważanym czasie  $t$  trwania pożaru, można ocenić jego stopień wyężenia w pożarze. W przypadku równoważnego równomiernego rozkładu temperatury w przekroju przyrost temperatury  $\Delta\theta_{a,t}$  w przedziale czasu  $\Delta t$  (s) w stalowym elemencie nieosłoniętym jest określony wzorem

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} h_{net,d} \Delta t \quad (9)$$

gdzie:

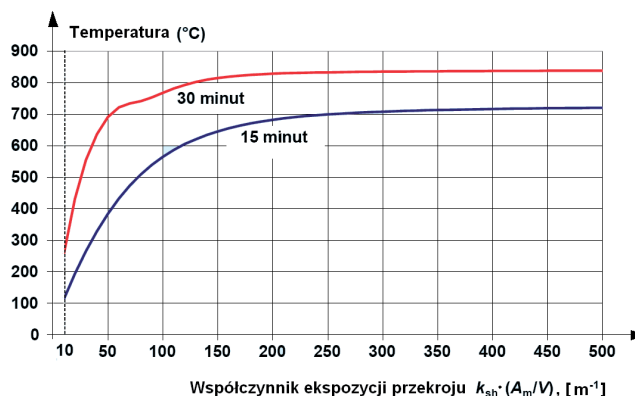
$A_m$  – pole powierzchni elementu na jednostkę długości,  $\text{m}^2/\text{m}$ ,

$V$  – objętość elementu na jednostkę długości,  $\text{m}^3/\text{m}$ ,

$c_a$  – ciepło właściwe stali jako funkcja temperatury według rozdziału 3 w PN-EN 1993-1-2,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,

$h_{net,d}$  – wartość obliczeniowa przyjętego strumienia ciepła wg PN-EN 1991-1-2,  $\text{W}/\text{m}^2$ ,  
 $\rho_a = 7850 \text{ kg}/\text{m}^3$  – masa jednostkowa stali.

Zależność (9) jest zapisana w postaci przyrostowej. Określenie jej odpowied-



— Rys. 4. Temperatura niezabezpieczonych elementów stalowych po 15 i 30 minutach oddziaływania pożaru standardowego ISO w funkcji współczynnika przekroju uwzględniającego efekt cienia  $k_{sh} \cdot (A_m/V)$  [10]

nika w wartościach całkowitych wymaga przyjęcia modelu pożaru i scałkowania po czasie, z wykorzystaniem np. jawnego algorytmu całkowania po czasie. Tablice służące do określenia temperatury po czasie  $t$  w przekrojach stalowych elementów bez izolacji ogniochronnej, przy ich różnych wartościach współczynników ekspozycji  $k_{sb} \cdot (A_m/V)$ , obliczone dla standardowej krzywej ekspozycji pożarowej, podano m.in. w [3], [4] i [5].

Zastosowanie metody obliczeniowej podanej w PN-EN 1993-1-2 z czasem działania standardowego pożaru wynoszącym 15 i 30 minut prowadzi do uzyskania krzywych temperatur przedstawionych na rys. 4 jako funkcja współczynnika przekroju uwzględniającego efekt cienia  $k_{sb} \cdot (A_m/V)$ .

### Analiza termiczna elementów stalowych z izolacją ogniochronną

W przypadku równoważnego, równomiernego rozkładu temperatury w przekroju przyrost temperatury  $\Delta\theta_{a,t}$  w przedziale czasu  $\Delta t$  (s) w stalowym elemencie osłoniętym jest określony wzorem

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

(lecz  $\Delta\theta_{a,t} \geq 0$  gdy  $\Delta\theta_{g,t} > 0$ ) (10)

w którym

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p (A_p/V) \quad (11)$$

gdzie:

$A_p$  – pole powierzchni materiału izolacji ogniochronnej na jednostkę długości elementu,  $m^2/m$ ,

$c_p$  – niezależne od temperatury ciepło właściwe materiału izolacji ogniochronnej,  $J/(kg \cdot K)$ ,

$d_p$  – grubość warstwy izolacji ogniochronnej,  $m$ ,

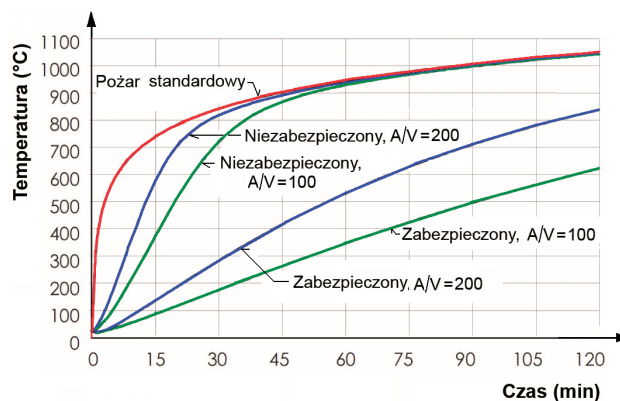
$\theta_{a,t}$  – temperatura stali w czasie trwania pożaru  $t$ ,  $^{\circ}C$ ,

$\theta_{g,t}$  – temperatura otaczających gazów w czasie trwania pożaru  $t$ ,  $^{\circ}C$ ,

$\Delta\theta_{g,t}$  – przyrost temperatury otaczających gazów w przedziale czasu  $\Delta t$ ,  $K$ ,

$\lambda_p$  – przewodność cieplna zabezpieczenia ogniochronnego,  $W/(m \cdot K)$ ,

$\rho_p$  – gęstość masy materiału izolacji ogniochronnej,  $kg/m$ .



Rys. 5. Krzywa pożaru standardowego i porównanie wzrostu temperatury elementów zabezpieczonych i niezabezpieczonych ogniochronnie [10]

We wzorze (11) można przyjąć po stronie bezpiecznej, że ciepło właściwe materiału izolacji ogniochronnej jest równe zeru. Przy tej wartości ciepła właściwego izolacji ogniochronnej wartość  $\phi = 0$  i zależność (11) przybiera wówczas uproszczoną postać:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_p \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{c_a \rho_a (1 + \phi/3)} \Delta t \quad (12)$$

gdzie:  $k_p$  – wskaźnik izolacyjności przekroju ( $W/m^3 \cdot K$ ), określony wzorem

$$k_p = \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \quad (13)$$

Wzór (13) po scałkowaniu umożliwia opracowanie nomogramów i tablic określających zmianę temperatury stali przy różnych wartościach wskaźnika izolacyjności przekroju  $k_p$  elementów osłoniętych izolacją ogniochronną. Tablice służące do określenia temperatury po czasie  $t$  stalowego elementu osłoniętego izolacją ogniochronną, przy założeniu standardowego modelu pożaru, podano między innymi w [3], [4] i [5]. Porównanie wzrostu temperatury elementów zabezpieczonych i niezabezpieczonych ogniochronnie pokazano na rys. 5.

### Metoda nośności

Metoda nośności oceny bezpieczeństwa pożarowego polega na obliczeniu wytrzymałości elementu  $R_{fi,d,t}$  po upływie wymaganego czasu ognioodporności  $t$  i porównaniu jej z efektem oddziaływań na konstrukcje w podwyższonej temperaturze  $E_{fi,d}$  (3). Zgodnie z PN-EN 1993-1-2 [9] należy przyjąć, że bezpieczeństwo elementu stalowego w warunkach pożaru jest zachowane w czasie  $t$ , jeśli spełniony jest warunek (1).

W celu uwzględnienia wpływu wysokiej temperatury w modelach oceny nośności  $R_{fi,d,t}$  w PN-EN 1993-1-2 [9] wprowadzono:

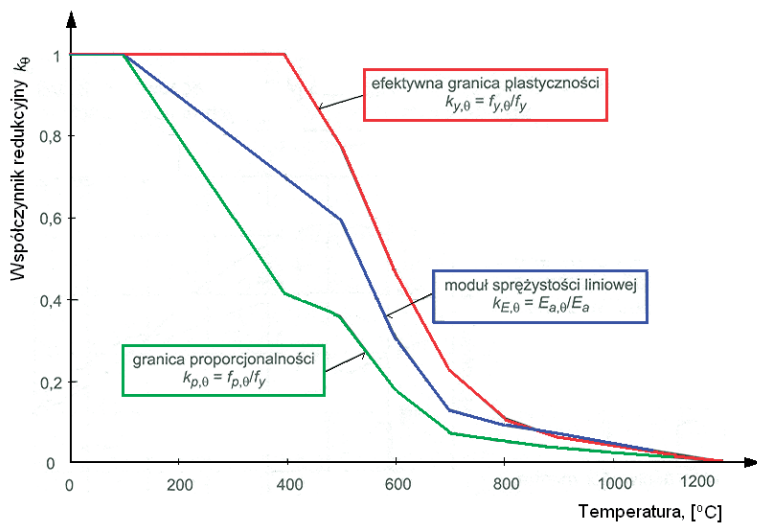
- obniżoną granicę plastyczności stali w podwyższonej temperaturze,
- współczynnik częściowy przy projektowaniu z uwagi na warunki pożarowe  $\gamma_{M,fi}$ ,
- zwiększoną smukłość względną,
- długość wyboeczeniową słupów w warunkach pożaru (w stężonych układach ramowych) przyjmuje się równą 0,5 i 0,7 ich długości teoretycznej, odpowiednio dla górnej kondygnacji i pozostałych kondygnacji,
- specjalne krzywe wyboeczeniowe dla warunków pożarowych.

Obliczeniową nośność elementu  $R_{fi,d,t}$  w czasie trwania pożaru  $t$  wyznacza się, przyjmując założenie o równomiernej temperaturze w jego przekroju. W wypadku nierównomiernego rozkładu temperatury w przekroju nośności elementów określa się, rozpatrując elementarne pola przekrojów z odpowiadającymi im współczynnikami redukcyjnymi granicy plastyczności.

### Właściwości stali w podwyższonej temperaturze

W podwyższonej temperaturze następuje degradacja właściwości mechanicznych stali. W PN-EN 1993-1-2 [9] przyjęto kształt charakterystyki stali  $\sigma$ – $\epsilon$  jak w temperaturze  $20^{\circ}C$ , z jednocześnie zmniejszeniem wartości: granicy proporcjonalności, granicy plastyczności oraz modułu sprężystości podłużnej, przez zastosowanie współczynników redukcyjnych  $k_{i,\theta}$ . Wartości obliczeniowe właściwości mechanicznych stali ►





■ Rys. 6. Wykresy współczynników redukcyjnych charakterystyki stali w podwyższonych temperaturach [9]

- w podwyższonej temperaturze określa się ze wzorów

$$f_{p,\theta} = k_{p,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,\theta}} \quad (14)$$

$$f_{y,\theta} = k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,\theta}} \quad (15)$$

$$E_\theta = k_{E,\theta} \frac{E}{\gamma_{M,\theta}} \quad (16)$$

gdzie:

$f_{p,\theta}$ ,  $f_{y,\theta}$ ,  $E_\theta$  – odpowiednio granica proporcjonalności, granica plastyczności oraz moduł sprężystości podłużnej stali w podwyższonej temperaturze,  
 $f_p$ ,  $f_y$ ,  $E$  – odpowiednio granica proporcjonalności, granica plastyczności oraz moduł sprężystości podłużnej stali w temperaturze 20°C,  
 $k_{p,\theta}$ ,  $k_{y,\theta}$ ,  $k_{E,\theta}$  – współczynniki redukcyjne odpowiednio granicy proporcjonalności, granicy plastyczności oraz modułu sprężystości podłużnej stali, których wykresy pokazano na rys. 6,

$\gamma_{M,\theta}$  – częściowy współczynnik bezpieczeństwa, który należy przyjmować  $\gamma_{M,\theta} = 1,0$ .

### Klasyfikacja przekrojów

W warunkach pożarowych przekroje poprzeczne są kwalifikowane tak jak w przypadku obliczeń konstrukcji stalowej w warunkach normalnych zgodnie PN-EN 1993-1-1 [8]. Wpływ efektów związanych ze zmianą właściwości wytrzymałościowych oraz odkształcalnościowych stali w podwyższonych temperaturach uwzględnia się, modyfikując

parametr  $\varepsilon$  ustalany według [8], przez zastosowanie współczynnika ewaluacji właściwości stali  $\kappa = 0,85$ . Klasyfikacji przekrojów elementów w warunkach pożaru należy dokonać z uwzględnieniem zredukowanej wartości  $\varepsilon$ , określonej wzorem

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (17)$$

Modyfikacja parametru (17) zmniejsza wartości graniczne smukłości ścianek  $\lambda_{sc} = c/t$  dla różnych klas przekrojów tak, że niektóre przekroje mogą być zakwalifikowane bardziej „rygorystycznie” niż w normalnej temperaturze eksploatacji obiektu.

### Obliczeniowa nośność elementu na rozciąganie

Obliczeniową nośność elementu rozciąganego o równomiernej temperaturze przekroju  $\theta_a$  określa się ze wzoru

$$N_{b,\theta,Rd} = k_{y,\theta} N_{Rd} \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,\theta}} \quad (18)$$

gdzie:

$N_{Rd}$  – obliczeniowa nośność przekroju w normalnej temperaturze wg PN-EN 1993-1-1,  
 $\gamma_{M0}$  – współczynnik częściowy do określenia nośności przekroju wg PN-EN 1993-1-1.

### Obliczeniowa nośność elementów ściskanych o przekrojach klasy 1, 2 i 3

Obliczeniową nośność na wyboczenie  $N_{b,\theta,Rd}$  elementów o przekrojach klasy 1, 2 lub 3 oraz równomiernym rozkładzie temperatury  $\theta_a$  określa się ze wzoru

$$N_{b,\theta,Rd} = \chi_{\theta} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,\theta}} \quad (19)$$

gdzie:

$A$  – pole przekroju elementu ściskanego,  
 $\chi_{\theta}$  – współczynnik wyboczenia giętnego w sytuacji pożarowej, określony jako wartość mniejsza z wartości  $\chi_{y,\theta}$  oraz  $\chi_{z,\theta}$  według wzorów

$$\chi_{\theta} = \frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{\phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad (20)$$

$$\phi_{\theta} = 0,5 \left[ 1 + \alpha \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta} \right] \quad (21)$$

w którym  $\alpha$  – parametr imperfekcji odpowiedniej krzywej wyboczeniowej – wyrażony jest zależnością

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (22)$$

Smukłość względną  $\bar{\lambda}_{\theta}$  elementu ściskanego w temperaturze  $\theta_a$  należy ustalić według wzoru

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (23)$$

gdzie:

$\bar{\lambda}$  – smukłość względną wyboczenia giętnego elementu w temperaturze normalnej według PN-EN 1993-1-1 [8]. Długości wyboczeniowe słupów  $l_e$  należy przyjmować jak w projektowaniu elementów w normalnej temperaturze, z wyjątkiem słupów ciągłych w stężonych układach ramowych. Wówczas należy przyjąć długość wyboczeniową  $l_e = 0,5L$  – w przypadku słupów kondygnacji pośrednich – oraz  $l_e = 0,7L$  – w przypadku słupów kondygnacji najwyższej (gdzie  $L$  – długość teoretyczna słupa rozpatrywanej kondygnacji).

### Obliczeniowa nośność elementów zginanych o przekrojach klasy 1, 2 i 3

Obliczeniową nośność na zginanie  $M_{b,\theta,Rd}$  z warunku zwiczenia elementów o przekroju klasy 1, 2 lub 3 oraz o równomiernym rozkładzie temperatury  $\theta_a$  należy określać ze wzoru

$$M_{b,\theta,Rd} = \chi_{LT,\theta} W_y k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,\theta}} \quad (24)$$

gdzie:

$W_y$  – wskaźnik plastyczny przekroju  
 $W_{pl,y}$  – w przypadku przekrojów klasy 1 i 2 – oraz wskaźnik sprężysty przekroju

$W_{el,y}$  – w przypadku przekrojów klasy 3 ,  
 $\chi_{LT,fi}$  – współczynnik zwichrzenia w sytuacji pożarowej, który oblicza się ze wzorów

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{\phi_{LT,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2}} \quad (25)$$

$$\phi_{LT,\theta} = 0,5 \left[ 1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta} + \bar{\lambda}_{LT,\theta} \right] \quad (26)$$

Smukłość względną  $\bar{\lambda}_{LT,\theta}$  elementu zginanego w temperaturze  $\theta_a$  należy ustalić według wzoru

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (27)$$

gdzie:  $\bar{\lambda}_{LT}$  – smukłość względna zwichrzenia elementu w temperaturze normalnej według PN-EN 1993-1-1 [8].

Przedstawiony sposób oceny nośności można stosować w przypadku zginanych dźwigarów zabezpieczonych przed zwichrzeniem, przyjmując  $\chi_{fi} = 1,0$ .

W PN-EN 1993-1-3 [9] podano szacunkowy sposób uwzględnienia wpływu nierównomiernego rozkładu temperatury w belkach na ich wyężenie. Wówczas w ocenie nośności można wprowadzić współczynnik przystosowania  $\kappa_1$  w celu uwzględnienia nierównomiernego rozkładu temperatury na całej wysokości kształtownika stalowego. Można również wprowadzić dodatkowy współczynnik przystosowania  $\kappa_2$ , aby uwzględnić zmienność temperatury elementu konstrukcyjnego na jego długości, gdy belka jest

statycznie niewyznaczalna. Wartości tych współczynników przystosowania należy przyjmować zgodnie z PN-EN 1993-1-2 [9].

### Obliczeniowa nośność przekroju na ścinanie

W przypadku elementów klasy 1, 2 lub 3, niewrażliwych na niestateczność miejscową pod wpływem naprężeń stycznych, obliczeniową nośność przy ścinaniu w warunkach pożaru określa się ze wzoru

$$V_{fi,Ed} = k_{y,\theta} V_{Rd} \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,\theta}} \quad (28)$$

gdzie:  $V_{Rd}$  – obliczeniowa nośność przekroju przy ścinaniu w temperaturze normalnej, określona według PN-EN 1993-1-1 [8].

### Nośność elementów o przekrojach klasy 4

W przypadku przekrojów klasy 4 nośność elementów stalowych jest zachowana, jeżeli podczas pożaru temperatura stali  $\theta_a$  nie przekracza wartości maksymalnej temperatury krytycznej  $\theta_{a,cr} = 350^\circ\text{C}$ .

### Obliczeniowa nośność elementów jednocześnie ściskanych i zginanych

W PN-EN 1993-1-2 [9] podano również uproszczoną metodę obliczeniową sprawdzenia ognioodporności jednocześnie ściskanych i zginanych elementów stalowych o przekrojach klasy 1, 2 lub 3 i o równomiernym rozkładzie temperatury  $\theta_a$ . W tej sytuacji projektowej prosty

model obliczeniowy uwzględnia łączny wpływ zginania i ściskania przez połączenie podanych wcześniej dwóch modeli prostych warunków obciążenia. □

### Piśmiennictwo

1. Biegus A.: *Podstawy projektowania konstrukcji. Oddziaływania na konstrukcje. Projektowanie konstrukcji stalowych*. Zeszyt Edukacyjny nr 1, Builder 2011.
2. Bródka J., Brodniewicz M.: *Projektowanie konstrukcji stalowych według Eurokodów*. Polskie Wydawnictwo Techniczne, Rzeszów 2010.
3. Franssen J.M., Zaharia R.: *Design of Steel Structures Subjected to Fire. Background and Design Guide to Eurocode 3*. Les Editions Universite de Liege, Liege-Belgium 2005.
4. 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.
5. Maślak M.: *Budownictwo ogólne – tom 5. Część 10: Odporność ogniowa. Nośność konstrukcji w warunkach pożaru*. Arkady, Warszawa 2010.
6. PN-EN 1990:2004 *Podstawy projektowania konstrukcji*.
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 – 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. [www.arcelormittal.com](http://www.arcelormittal.com): *Konstrukcje stalowe w Europie. Jednokondygnacyjne konstrukcje stalowe. Część 7: Inżynieria pożarowa*.

reklama