

1.2. Przeznaczenie i zakres stosowania

Poradnik dotyczy zasad projektowania elementów konstrukcji stalowych z uwagi na wymagania odporności ogniowej. Poradnik może być także pomocny przy ocenie odporności ogniowej konstrukcji w fazie ich odbioru i eksploatacji. Podstawę do opracowania poradnika stanowiły normy PN-EN 1993-1-2 [23], PN-EN 1991-1-2 [19], PN-EN 13381-4 [34, 35], PN-EN 13381-8 [36] i inne.

Poradnik jest przeznaczony dla projektantów i wykonawców konstrukcji budowlanych oraz rzeczoznawców budowlanych i do spraw zabezpieczeń przeciwpożarowych, a także dla osób i instytucji zajmujących się odbiorem i utrzymaniem właściwości użytkowych budynków.

Opracowanie dotyczy elementów stalowych projektowanych z uwzględnieniem oddziaływania wyjątkowego pożaru standardowego, określonego normą PN-EN 1991-1-2 [19].

Jego zakres obejmuje elementy konstrukcji stalowych ujęte w normie [23], zaprojektowane i skonstruowane zgodnie z PN-EN 1993-1-1 [22] oraz normami zawierającymi reguły uzupełniające do wyżej wymienionej, tj. PN-EN 1993-1-3 [24] (kształtowniki i blachy profilowane na zimno), PN-EN 1993-1-4 [25] (konstrukcje ze stali nierdzewnych), PN-EN 1993-1-5 [26] (blachownice), PN-EN 1993-1-8 [27] (węzły), PN-EN 1993-1-11 [28] (konstrukcje cięgnowe).

1.3. Powołania normatywne

Norma PN-EN 1993-1-2 [23] przywołuje inne normy związane zawsze w formie niedatowanej. W związku z tym niniejszy poradnik oparto o najnowsze wydania norm (wraz z ich zmianami i poprawkami), które również przywołano w formie niedatowanej. W celach informacyjnych w bibliografii zawarto pozycje datowane.

2. PODSTAWY PROJEKTOWANIA KONSTRUKCJI Z UWAGI NA WARUNKI POŻAROWE

2.1. Oddziaływania termiczne pożaru na konstrukcje

Podstawowe zasady dotyczące oddziaływań termicznych i mechanicznych na konstrukcje w warunkach pożaru oraz kryteriów R, E, I odporności ogniowej (zwanym również, zgodnie z PN-EN 13501-2 [31], charakterystykami skuteczności działania), wynikających z funkcji elementów w budynku, przedstawiono w punkcie 2.2. Właściwości materiałowe najbardziej istotne dla zachowania konstrukcji stalowych w warunkach pożarowych scharakteryzowano w rozdziale 3.

Odporność ogniową określa się przy podstawowych scenariuszach pożaru rozwiniętego, zwanych pożarami nominalnymi, zdefiniowanymi w PN-EN 1991-1-2 [19]. Norma PN-EN 13381-8 [36] definiuje również tzw. krzywą powolnego nagrzewania, mającą zastosowanie przy ocenie skuteczności ogniochronnej aktywnych materiałów ogniochronnych, gdy zachodzi prawdopodobieństwo, iż skuteczność ogniochronna materiału podczas oddziaływania tłącego się pożaru mogłaby być zasadniczo gorsza niż przy nagrzewaniu według krzywej standardowej.

Krzywe temperatury gazu w strefie pożarowej opisują następujące zależności:

-- krzywa standardowa (N)
$$\theta_g = 345 \log_0(8t + 1) + 20 \quad (1)$$

-- krzywa węglowodorowa (H)
$$\theta_g = 1080 \left(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t} \right) + 20 \quad (2)$$

-- krzywa „zewnątrzna” (E)
$$\theta_g = 660 \left(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t} \right) + 20 \quad (3)$$

-- krzywa „powolnego nagrzewania” (S), przez pierwsze 20 minut
$$\theta_g = 154\sqrt{t} + 20 \quad (4)$$

następnie według zależności:

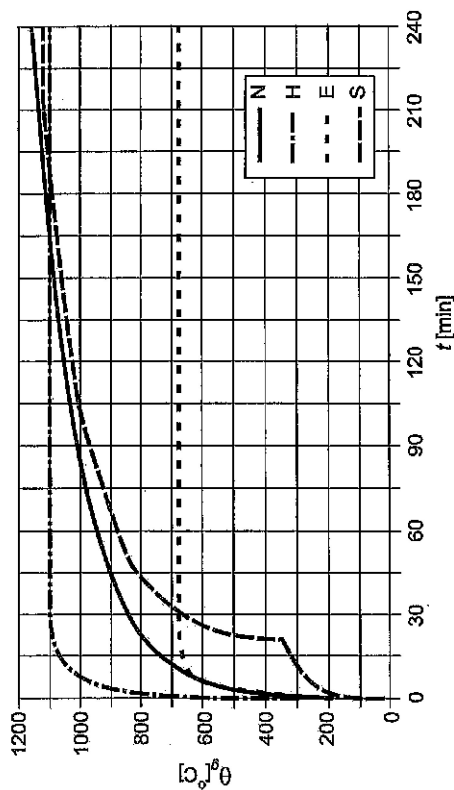
$$\theta_g = 345 \log_{10}[8(t - 20) + 1] + 20 \quad (5)$$

gdzie:

θ_g – temperatura gazu w strefie pożarowej [°C],
 t – czas [min].

Krzywe nominalne „temperatura – czas”, opisane zależnościami od (1) do (3) oraz krzywą powolnego nagrzewania (4) i (5), przedstawiono na rysunku 1.

W odniesieniu do konstrukcji stalowych istotne są wszystkie następujące krzywe: N (standardowa – powiązana z pożarem celulozowym), H (węglowodorowa – powiązana z pożarem produktów naftowych), E (zewnątrzna – stosowana przy oddziaływaniu ognia na elementy budynku od strony elewacji) oraz S (powolnego nagrzewania – związana z właściwościami aktywnych zabezpieczeń ogniochronnych stali, takimi jak farby pęczniące).



Rys. 1. Nominalne krzywe charakteryzujące oddziaływania termiczne (pożar rozwinięty) oraz krzywa powolnego nagrzewania (S)

Zgodnie z postanowieniami normy PN-EN 13501-2 [31], normy PN-EN 1993-1-2 [23] oraz rozporządzenia [43], klasyfikację w zakresie odporności ogniowej elementów stalowych ustala się na podstawie badań lub obliczeń dla scenariusza pożaru standardowego (krzywa N). W przypadku innych nominalnych scenariuszy pożarowych (węglowodorowy H lub zewnętrzny E) ocenę odporności ogniowej można przeprowadzić, wykorzystując zaawansowane metody obliczeń (por. p. 5.3) lub wyniki badań, jednak dokonana wówczas ocena nie będzie równoważna ustaleniu klasy odporności ogniowej elementu, formalnie zgodnej z krajowymi przepisami.

Norma PN-EN 1991-1-2 [19] wprowadza i definiuje naturalne modele pożaru (pożaru lokalnego oraz strefowego), w którym warunki nagrzewania określa się indywidualnie na podstawie analizy parametrów chemicznych i fizycznych procesu spalania, a także indywidualnego scenariusza rozwoju pożaru w pomieszczeniu lub obiekcie. Obecnie, na podstawie zapisów w załączniku krajowym do

normy [19] oraz postanowień rozporządzenia [43], naturalne modele pożaru nie powinny być wykorzystywane do analizy i oceny odporności ogniowej elementów stalowych. Z tego powodu zaganienia oddziaływania pożarów naturalnych na konstrukcje zostały w poradniku pominięte.

Oddziaływania termiczne na konstrukcje określa gęstość strumienia ciepła na powierzchni elementu. W obliczeniach pól temperatury, ustalając warunki brzegowe, należy uwzględnić wymianę ciepła przez:

- konwekcję (w modelu pożaru standardowego współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni nagrzewanej $\alpha = 25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ oraz nieogrzewanej $\alpha = 9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ – jeśli współczynnik uwzględni wpływ promieniowania lub $\alpha = 4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ – jeśli wpływ promieniowania rozpatrywany jest oddzielnie),
- radiację (emisyjność powierzchni stalowych ze stali węglowej $\varepsilon = 0,7$ oraz powierzchni stalowych ze stali nierdzewnej $\varepsilon = 0,4$).

Analiza pól temperatury w elementach poddawanych oddziaływaniu pożaru jest jedną z podstaw oceny odporności ogniowej konstrukcji. Ustalenie rozwoju i rozkładu temperatury w elemencie, z racji wykorzystywania metod i modeli pozwalających na realistyczną analizę konstrukcji w warunkach pożaru, zalicza się do zaawansowanych technik obliczeń. Z reguły analizę taką przeprowadza się z wykorzystaniem technik komputerowych. W przypadku oceny elementów nośnych analizie termicznej towarzyszy zwykle, jako kolejny etap, analiza mechaniczna na elemencie lub konstrukcji. Oddziaływania mechaniczne na konstrukcje w warunkach pożaru omówiono w punkcie 2.3.

2.2. Kryteria odporności ogniowej

Wykorzystywane w normach i przepisach klasy odporności ogniowej są definiowane w normie PN-EN 13501-2 [31]. W odniesieniu do konstrukcji stalowych najistotniejszą charakterystyką skuteczności działania jest nośność ogniowa R. Pozostałe charakterystyki, w tym szczelność ogniowa E oraz izolacyjność ogniowa I, nie podlegają ocenie według PN-EN 1993-1-2 [23].

Nośnością ogniową R nazywamy zdolność elementu konstrukcji do wytrzymania oddziaływania ognia przy określonych wpływach mechanicznych na jedną lub więcej powierzchni elementu konstrukcji, przez określony czas, bez utraty nośności lub stateczności bądź przekroczenia dopuszczalnych wartości przesmiezczeń lub odkształceń.

Dodatkowo stosuje się rozszerzające parametry skuteczności działania, z których istotne w odniesieniu do konstrukcji stalowych są:

- IncSlow – w odniesieniu do elementów, które dodatkowo były oceniane przy krzywej powolnego nagrzewania (np. R 30-IncSlow),
- ef – w odniesieniu do elementów, które dodatkowo były oceniane przy krzywej oddziaływania od zewnątrz (np. R 30-ef).

Norma PN-EN 1993-1-2 [23] wskazuje, iż przy ocenie nośności ogniowej R konstrukcje stalowe powinny być zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby ich funkcja nośna była utrzymana podczas określonego czasu nagrzewania według krzywej standardowej. Kryteria odkształceniowe należy stosować, gdy wymaga się rozpatrzenia deformacji konstrukcji nośnej – np. przy ocenie skuteczności ogniowej zabezpieczeń lub projektowaniu elementów oddzielających.

W odniesieniu do elementów stalowych ocenianych przy nagrzewaniu według krzywej węglowodorowej stosuje się te same kryteria co przy nagrzewaniu według krzywej standardowej, przy czym dla odróżnienia warunków ekspozycji należy stosować oznaczenie HC (np. R 30 HC). Często spotyka się też formę opisową, np. „klasa odporności ogniowej R 30 przy nagrzewaniu według krzywej węglowodorowej”.

2.3. Obciążenia w warunkach pożarowych

Zgodnie z PN-EN 1990 [17] pożar należy traktować jako sytuację wyjątkową, a konstrukcję, wykorzystując następującą kombinację wyjątkową obciążeń:

$$\sum G_{k,j} + (\psi_{1,1} \text{ lub } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} + A_d(t) \quad j \geq 1, i \geq 1 \quad (6)$$

gdzie:

- $G_{k,i}$ – wartość charakterystyczna oddziaływań stałych,
- $Q_{k,1}$ – wartość charakterystyczna podstawowego oddziaływania zmiennego,
- $Q_{k,i}$ – wartość charakterystyczna pozostałych oddziaływań zmiennych,
- $A_d(t)$ – wartość obliczeniowa oddziaływań spowodowanych pożarem, tj. oddziaływań pośrednich i dodatkowych,
- ψ_1, ψ_2 – współczynniki do określania wartości reprezentatywnych obciążeń (wartości częste i wartości prawie stałe), które zależą od typu i kategorii obciążenia zmiennego i wynoszą $\psi_1 = 0,2$ do $0,9$ oraz $\psi_2 = 0$ do $0,8$.

Zgodnie z załącznikiem krajowym do PN-EN 1991-1-2 [19] zaleca się przyjmowanie współczynnika kombinacyjnego podstawowego oddziaływania zmiennego $Q_{k,1}$ równego ψ_1 (wartość częsta).

W sytuacji, gdy nie zachodzi konieczność uwzględnienia pośrednich oddziaływań pożaru, norma PN-EN 1991-1-2 [19] dopuszcza uproszczone sposoby określania obciążeń konstrukcji, w których:

- uwzględnia się kombinację obciążeń (6) przy założeniu $t = 0$, tj. oddziaływanie traktuje się jako niezmiennie w czasie trwania pożaru,
- efekt oddziaływań w sytuacji pożarowej ustala się według wzoru:

$$E_{d,\dot{\eta}} = \eta_{\dot{\eta}} E_d \quad (7)$$

gdzie:

E_d – wartość obliczeniowa odpowiednich sił wewnętrznych i reakcji w temperaturze normalnej, wyznaczana dla podstawowej kombinacji obciążeń, zgodnie z PN-EN 1990 [17],

$\eta_{\dot{\eta}}$ – współczynnik redukcyjny dla obliczeniowego obciążenia w przypadku pożaru, którego wartość wynosi:

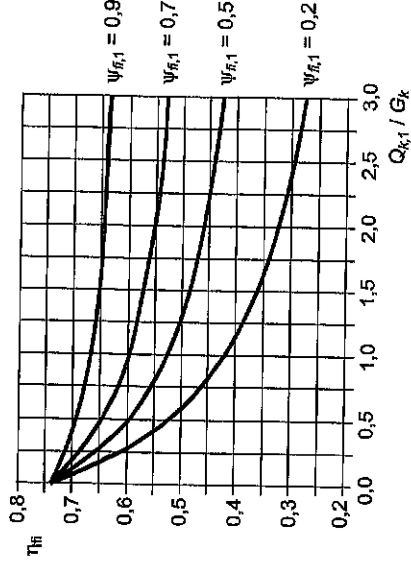
$$\eta_{\dot{\eta}} = \frac{G_k + \psi_{\dot{\eta}} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (8)$$

$$\eta_{\dot{\eta}} = \frac{G_k + \psi_{\dot{\eta}} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}} \quad (9)$$

$$\eta_{\dot{\eta}} = \frac{G_k + \psi_{\dot{\eta}} Q_{k,1}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (10)$$

Wzór (8) stosuje się, jeśli kombinacja podstawowa była wyznaczana według wzoru (6.10) z PN-EN 1990 [17], jeśli zaś wyznaczono ją na podstawie wzorów (6.10a) i (6.10b), zgodnie z zaleceniem załącznika krajowego NB do normy [17], stosuje się wartość mniejszą spośród otrzymanych z wzorów (9) i (10).

Wartość $\eta_{\dot{\eta}}$ zależy od stosunku podstawowego oddziaływania zmiennego $Q_{k,1}$ do obciążeń stałych G_k , współczynników częściowych γ_G i $\gamma_{Q,1}$ dla obciążeń stałych i podstawowego oddziaływania zmiennego przy projektowaniu w temperaturze normalnej oraz od kombinacyjnego współczynnika obciążeń zmiennych $\psi_{\dot{\eta}}$, który może być przyjmowany jako $\psi_{1,1}$ lub $\psi_{2,1}$ (zgodnie z załącznikiem krajowym do PN-EN 1991-1-2 [19] zaleca się przyjmowanie współczynnika kombinacyjnego $\psi_{\dot{\eta}} = \psi_{1,1}$, tj. w kontekście wartości odniesionej do kombinacji częstej). Przykładowy przebieg zależności $\eta_{\dot{\eta}}(\xi)$, dla kilku wartości $\psi_{\dot{\eta}}$ ukazano na rysunku 2.



Rys. 2. Zmienność współczynnika redukcyjnego obciążeń w warunkach pożarowych

Norma PN-EN 1991-1-2 [19], przy ustalaniu oddziaływań na konstrukcje stalowe w warunkach pożaru, dopuszcza jako bezpieczne przyjmowanie z pominięciem dokładniejszej analizy współczynnika redukcyjnego obciążeń o wartości $\eta_f = 0,65$, z wyjątkiem obciążenia zmiennego należącego do kategorii E według PN-EN 1991-1-1 [18] (powierzchnie wykorzystywane do składowania towarów wraz z miejscami dostępu do tych obszarów), kiedy zaleca się przyjmowanie wartości $\eta_f = 0,70$.

Należy pamiętać, iż współczynniki częściowe γ_G i γ_Q dla obciążeń stałych i zmiennych uzyskują wartości według Eurokodu, tj. $\gamma_G = 1,35$ oraz $\gamma_Q = 1,50$. Wartości współczynników ψ_1 lub ψ_2 podane są w normie PN-EN 1990 [17] (tabl. A.1.1). Wartości te, w zależności od kategorii i sposobu użytkowania obiektu, zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Zalecane wartości współczynników ψ_0 , ψ_1 i ψ_2 dla budynków

Oddziaływania	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Obciążenie zmienne w budynkach (patrz PN-EN 1991-1-1 [18])			
Kategoria A: powierzchnie mieszkalne	0,7	0,5	0,3
Kategoria B: powierzchnie biurowe	0,7	0,5	0,3
Kategoria C: miejsca zebrań	0,7	0,7	0,6
Kategoria D: powierzchnie handlowe	0,7	0,7	0,6
Kategoria E: powierzchnie magazynowe	1,0	0,9	0,8
Kategoria F: powierzchnie ruchu pojazdów (pojazdy ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Kategoria G: powierzchnie ruchu pojazdów (30 kN < ciężar pojazdu ≤ 160 kN)	0,7	0,5	0,3
Kategoria H: dachy	0	0	0
Obciążenie budynków śniegiem (patrz PN-EN 1991-1-3 [20])			
Miejscowości położone na wysokości $H > 1000$ m n.p.m.	0,70	0,50	0,20
Miejscowości położone na wysokości $H \leq 1000$ m n.p.m.	0,50	0,20	0
Oddziaływanie wiatrem (patrz PN-EN 1991-1-4 [21])	0,60	0,20	0

Sposób ustalenia wielkości oddziaływań w wyjątkowej sytuacji obliczeniowej i współczynnika redukcji obciążeń w warunkach pożarowych zilustrowano w przykładzie 1.

PRZYKŁAD 1. OBCIĄŻENIE PŁATWII DACHOWEJ IPE 200 W BUDYNKU O PRZEZNACZENIU HANDLOWYM ($H < 1000$ M)

Zestawienie obciążeń

1. Ciężar własny belki IPE 200 $G_{k,1} = 0,22$ kN/m
2. Ciężar własny konstrukcji dachu $G_{k,2} = 2,10$ kN/m
3. Obciążenie śniegiem $Q_{k,1} = 1,83$ kN/m
4. Oddziaływanie wiatru $Q_{k,2} = 0,39$ kN/m

Uproszczona analiza obciążeń

Współczynnik redukcyjny obciążeń w warunkach pożarowych:

$$\eta_{f,a} = \frac{G_k + \psi_f Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}} = \frac{2,32 + 0,2 \times 1,83}{1,35 \times 2,32 + 1,50 \times 0,50 \times 1,83} = 0,60$$

$$\eta_{f,b} = \frac{G_k + \psi_f Q_{k,1}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} = \frac{2,32 + 0,2 \times 1,83}{0,85 \times 1,35 \times 2,32 + 1,50 \times 1,83} = 0,50$$

$$\eta_f = \eta_{f,b} = 0,50$$

Dokładna analiza obciążeń

Kombinacje podstawowe (warunki normalne):

$$E_{d,a} = \sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$E_{d,b} = \sum \xi \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$E_{d,a} = 1,35 \times (0,22 + 2,10) + 1,50 \times 0,50 \times 1,83 + 1,50 \times 0,60 \times 0,39 = 4,86$$

$$E_{d,b} = 1,35 \times 0,85 \times (0,22 + 2,10) + 1,50 \times 1,83 + 1,50 \times 0,60 \times 0,39 = 5,76$$

Obciążenie obliczeniowe w warunkach normalnych wynosi:

$$E_d = E_{d,b} = 5,76 \text{ kN/m}$$

Kombinacje wyjątkowe (warunki pożarowe):

$$E_{d,f} = \sum G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Obciążenie obliczeniowe w warunkach pożarowych:

$$E_{d,f} = 2,32 + 0,20 \times 1,83 + 0,00 \times 0,39 = 2,69 \text{ kN/m}$$

Współczynnik redukcyjny obciążeń w warunkach pożarowych (dokładna analiza obciążeń):

$$\eta_f = \frac{E_{d,f}}{E_d} = \frac{2,69}{5,76} = 0,47$$

Warto zauważyć, iż współczynnik redukcyjny obciążeń w powyższym przykładzie ($\eta_f = 0,47$) jest istotnie niższy od tego, który należałoby przyjąć bez dokonywania analizy obliczeniowej ($\eta_f = 0,65$). Dotyczy to większości projektowanych konstrukcji. W konsekwencji wyznaczona temperatura krytyczna stali będzie wyższa, co pozwoli na łatwiejsze spełnienie kryteriów nośności ogniowej niezabezpieczonych elementów konstrukcji albo dobranie mniejszej grubości izolacji ogniochronnej.

2.4. Obliczeniowe właściwości materiałów

Analiza zachowania i ocena nośności konstrukcji $R_{d,t,\theta}$ w warunkach pożarowych wymaga znajomości właściwości termicznych i mechanicznych stali w wyśokich temperaturach. Obliczenia mechaniczne i wytrzymałościowe konstrukcji w warunkach pożarowych przeprowadza się dla wartości obliczeniowych właściwości mechanicznych stali, zdefiniowanych następująco:

$$X'_{d,t,\theta} = \frac{k_0 X_k}{\gamma_{M,t,\theta}} \quad (11)$$

gdzie:

X_k – wartość charakterystyczna właściwości w temperaturze normalnej,
 k_0 – współczynnik redukcyjny zależny od temperatury,

$\gamma_{M,t,\theta}$ – częściowy współczynnik bezpieczeństwa w warunkach pożarowych.

Zalecana wartość współczynnika bezpieczeństwa, zarówno dla własności mechanicznych, jak i termicznych, wynosi $\gamma_{M,t,\theta} = 1,0$. Oznacza to, iż nośność elementów stalowych określa się, wykorzystując wartości charakterystyczne wytrzymałości stali.

3. WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW

3.1. Stal węglowa

3.1.1. Właściwości mechaniczne

Do wyznaczania nośności przy rozciąganiu, ściskaniu, zginaniu i ścinaniu stosuje się następujące współczynniki redukcyjne podane w PN-EN 1993-1-2 [23]:

– stosunek efektywnej granicy plastyczności do granicy plastyczności w temperaturze 20°C,

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \quad (12)$$

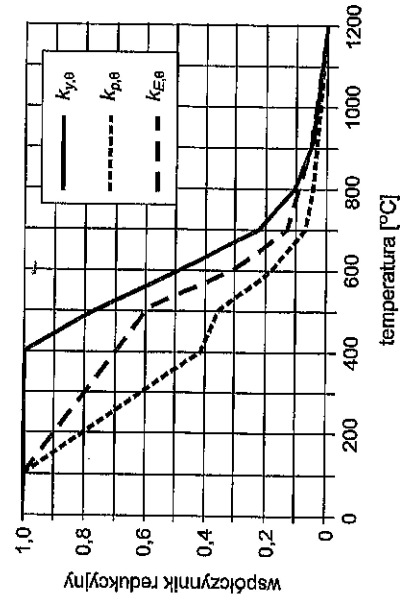
– stosunek granicy proporcjonalności do granicy plastyczności w temperaturze 20°C,

$$k_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{f_y} \quad (13)$$

– stosunek modułu sprężystości liniowej do modułu sprężystości w temperaturze 20°C.

$$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a} \quad (14)$$

Zależności powyższe przedstawiono na rysunku 3 i w tablicy 2. Ponadto na rysunku 4 i w tablicy 3 przedstawiono zależności naprężenie-odkształcenie stali węglowej w podwyższonych temperaturach.

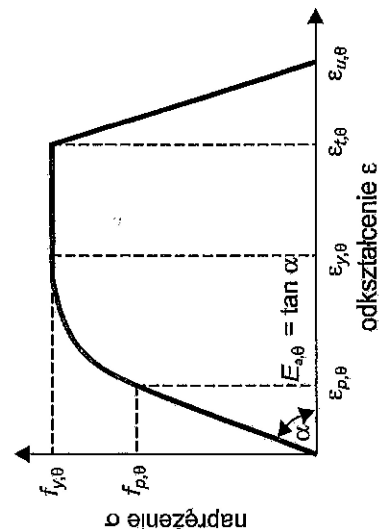


Rys. 3. Współczynniki redukcyjne w zależności naprężenie-odkształcenie stali węglowej w podwyższonych temperaturach

Tablica 2. Współczynniki redukcyjne do zależności naprężenie-odkształcenie dla stali węglowych w podwyższonych temperaturach

Temperatura stali θ_a	Współczynniki redukcyjne przy temperaturze θ_a w stosunku do wartości f_y lub E_a w temperaturze 20°C		
	współczynnik redukcji granicy plastyczności (w stosunku do f_y)	współczynnik redukcji granicy proporcjonalności (w stosunku do f_y)	współczynnik redukcji modułu sprężystości liniowej (w stosunku do E_a)
	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20°C	1,000	1,000	1,000
100°C	1,000	1,000	1,000
200°C	1,000	0,807	0,900
300°C	1,000	0,613	0,800
400°C	1,000	0,420	0,700
500°C	0,780	0,360	0,600
600°C	0,470	0,180	0,310
700°C	0,230	0,075	0,130
800°C	0,110	0,050	0,090
900°C	0,060	0,0375	0,0675
1000°C	0,040	0,0250	0,0450
1100°C	0,020	0,0125	0,0225
1200°C	0,000	0,0000	0,0000

Uwaga: Dla pośrednich wartości temperatury można stosować interpolację liniową.



Rys. 4. Zależność naprężenie-odkształcenie stali węglowej w podwyższonych temperaturach

Tablica 3. Zależności naprężenie-odkształcenie oraz moduł sprężystości dla stali węglowej w podwyższonych temperaturach

Zakres odkształceń	Naprężenie σ	Moduł styczny
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + \left(\frac{b}{a}\right) \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}}$
$\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0,00
$\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} \left[1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}}{\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}} \right]$	—
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0,00	—
Parametry	$\varepsilon_{a,\theta} = f_{p,\theta} / E_{a,\theta}$	$\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$
		$\varepsilon_{p,\theta} = 0,15$
		$\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$
	$a_2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) E_{a,\theta} + c / E_{a,\theta}$	
Funkcje	$b^2 = c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) E_{a,\theta} + c^2$	
	$c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$	
	$f_{y,\theta}$ – efektywna granica plastyczności, $f_{p,\theta}$ – granica proporcjonalności, $E_{a,\theta}$ – moduł sprężystości liniowej, $\varepsilon_{p,\theta}$ – odkształcenie przy osiągnięciu granicy proporcjonalności, $\varepsilon_{y,\theta}$ – odkształcenie przy osiągnięciu granicy plastyczności, $\varepsilon_{u,\theta}$ – odkształcenie przy końcu plastycznego płynięcia, $\varepsilon_{u,\theta}$ – odkształcenie graniczne	

Właściwości mechaniczne stali węglowych zaczynają ulegać obniżeniu przy temperaturze powyżej 400°C. Warto zauważyć, iż moduł sprężystości stali maleje szybciej niż granica plastyczności, czego skutkiem może być zmiana mechanizmu zniszczenia konstrukcji w sytuacji pożarowej, np. w wyniku zwichrzenia belki (ogólnej utraty stateczności) lub wybrzuszenia środka (miejscowej utraty stateczności), przed osiągnięciem przegubu plastycznego.

W załączniku A do PN-EN 1993-1-2 [23] zamieszczono alternatywną do przedstawionej na rysunku 3 zależność naprężenie-odkształcenie, uwzględniającą umocnienie stali w podwyższonych temperaturach (poniżej 400°C), według zależności (rys. 5):

— dla $0,02 < \varepsilon < 0,04$:

$$\sigma_a = 50 (f_{u,\theta} - f_{y,\theta}) \varepsilon + 2f_{y,\theta} - f_{u,\theta} \quad (15)$$

4. TEMPERATURA ELEMENTÓW STALOWYCH

4.1. Informacje ogólne

Określenie temperatury elementu stalowego, niezbędne do oceny jego nośności ogniowej, można uzyskać za pomocą numerycznych analiz przepływu ciepła, wykorzystując podane w rozdziale 3 właściwości termiczne stali i materiałów ogniochronionych (w przypadku elementów zabezpieczonych ogniochronnie) lub obliczeniowo zgodnie z PN-EN 1993-1-2 [23]. W pierwszej kolejności należy ustalić warunki nagrzewania elementu, wyznaczyć wskaźnik ekspozycji przekroju nieosłoniętego lub z izolacją ogniochronną, a następnie obliczać w małych krokach czasowych przyrost temperatury stali.

W załączniku A na podstawie danych zamieszczonych w programie sprzedaży [7] zestawiono wskaźniki ekspozycji przekrojów nieosłoniętych (z uwzględnieniem efektu zacięcia) lub z izolacją ogniochronną skrzynkową, lub konturową, dla najpopularniejszych kształtowników otwartych (IPE, IPN, HE, UPE, UPE) oraz kształtowników zamkniętych kwadratowych, prostokątnych i okrągłych, zarówno przy trójstronnym, jak i czterostronnym nagrzewaniu.

Temperaturę stali elementów nieosłoniętych, wykonanych ze stali węglowych lub nierdzewnych, w zależności od wskaźnika ekspozycji przekroju zestawione w załączniku B.

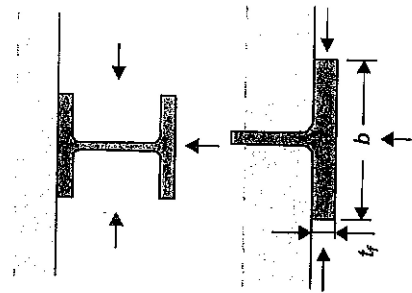
4.2. Wskaźnik ekspozycji przekroju nieosłoniętego

Wskaźniki ekspozycji przekroju A_m/V (zwane także wskaźnikami masywności U/A) nieosłoniętych elementów stalowych wyznacza się następująco:

– przekrój otwarty ogarnięty pożarem ze wszystkich stron:

$$A_m/V = \frac{\text{obwód}}{\text{pole przekroju stalowego}}$$


– przekrój otwarty ogarnięty pożarem z trzech stron:

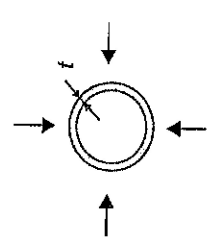
$$A_m/V = \frac{\text{powierzchnia ogarnięta pożarem}}{\text{pole przekroju stalowego}}$$


– półka przekroju dwuteowego ogarnięta pożarem z trzech stron:

$$A_m/V = \frac{b + 2t_f}{b \times t_f}$$

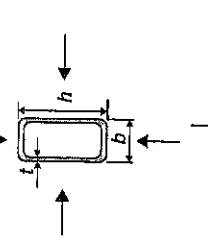
jeżeli $t \ll b$, to $A_m/V \approx \frac{1}{t_f}$

– rura okrągła ogarnięta pożarem ze wszystkich stron:

$$A_m/V = \frac{1}{t}$$


– kształtownik rurowy prostokątny (lub spawany przekrój skrzynkowy o stałej grubości ścianki) ogarnięty pożarem ze wszystkich stron:

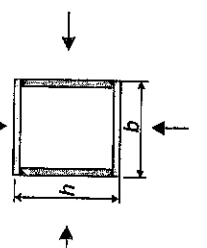
jeżeli $t \ll b$, to $A_m/V \approx \frac{1}{t}$



– przekrój skrzynkowy spawany ogarnięty pożarem ze wszystkich stron:

$$A_m/V = \frac{2(b + h)}{\text{pole przekroju poprzecznego}}$$

jeżeli $t \ll b$, to $A_m/V \approx \frac{1}{t}$



- przekrój dwuteowy wzmocniony blachami tworzącymi przekrój skrzynkowy, ogarnięty pożarem ze wszystkich stron:

$$A_m/V = \frac{2(b+h)}{\text{pole przekroju poprzecznego}}$$

- kątownik ogarnięty pożarem ze wszystkich stron:

$$A_m/V = \frac{2}{t}$$

- płaskownik ogarnięty pożarem ze wszystkich stron:

$$A_m/V = \frac{2(b+h)}{b \cdot t}$$

$$\text{jeżeli } t \ll b, \text{ to } A_m/V \approx \frac{2}{t}$$

- płaskownik ogarnięty pożarem z trzech stron:

$$A_m/V = \frac{b+2t}{bt}$$

$$\text{jeżeli } t \ll b, \text{ to } A_m/V \approx \frac{1}{t}$$

PRZYKŁAD 2. WSKAŹNIK EKSPOZYCJI PRZEKROJU NIEOSŁONIĘTEGO

Kształtownik HEB 450 – nagrzewany 4-stronnie, nieosłonięty

Obwód nagrzewany = obwód całego przekroju $A_m = 2025 \text{ mm}$

Pole przekroju poprzecznego $V = 218 \text{ cm}^2$

Wskaźnik ekspozycji przekroju nieosłoniętego $A_m/V = 93 \text{ m}^{-1}$

Kształtownik IPE 120 – nagrzewany 3-stronnie (mocowany do stropu półką górną), nieosłonięty

Obwód nagrzewany = obwód całego przekroju – szerokość półki górnej

$$A_m = 475 - 64 = 411 \text{ mm}$$

Pole przekroju poprzecznego $V = 13,2 \text{ cm}^2$

Wskaźnik ekspozycji przekroju nieosłoniętego $A_m/V = 312 \text{ m}^{-1}$

Kształtownik SHS 300x6 – nagrzewany 4-stronnie, nieosłonięty

Obwód nagrzewany $A_m = 4 \times 300 = 1200 \text{ mm}$

Pole przekroju poprzecznego $V = (300 \times 300) - (288 \times 288) = 70,5 \text{ cm}^2$

Wskaźnik ekspozycji przekroju nieosłoniętego obliczony dokładnie

$$A_m/V = 170 \text{ m}^{-1}$$

Wskaźnik ekspozycji przekroju nieosłoniętego obliczony z grubości ścianki

$$A_m/V = \frac{1}{t} = \frac{1}{6} = 167 \text{ m}^{-1}$$

4.3. Wskaźnik ekspozycji przekroju zabezpieczonego

Wskaźniki ekspozycji przekroju A_p/V dla elementów stalowych z izolacją ogniochronną oblicza się w następujący sposób:

- izolacja konturowa o stałej grubości

$$A_p/V = \frac{\text{obwód przekroju stalowego}}{\text{pole przekroju stalowego}}$$

- izolacja skrzynkowa o stałej grubości

$$A_p/V = \frac{2(b+h)}{\text{pole przekroju stalowego}}$$

- izolacja konturowa o stałej grubości, narażona na pożar z trzech stron

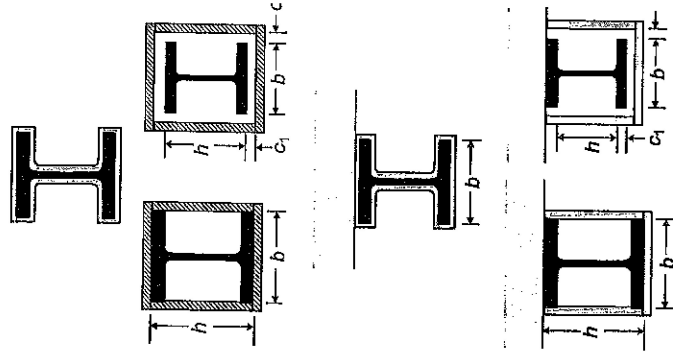
$$A_p/V = \frac{\text{wymiar } b \text{ przekroju stalowego}}{\text{pole przekroju stalowego}}$$

- izolacja skrzynkowa o stałej grubości, narażona na pożar z trzech stron

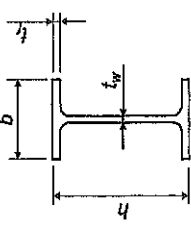
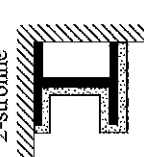
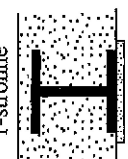
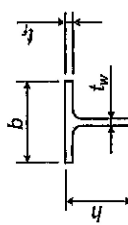

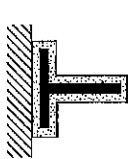

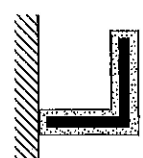
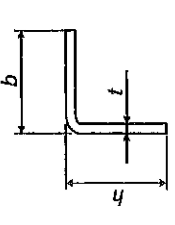

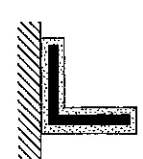
$$A_p/V = \frac{2h+b}{\text{pole przekroju stalowego}}$$

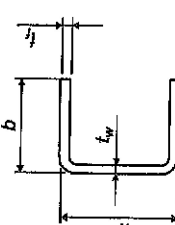



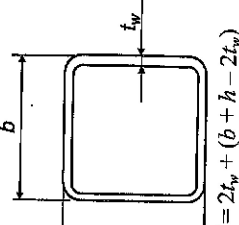
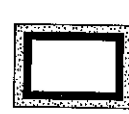
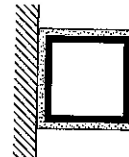
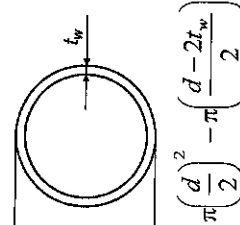
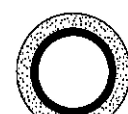
Wymiary szczelin c_1 i c_2 nie powinny na ogół przekraczać $h/4$.

Uzupełnieniem zapisów PN-EN 1993-1-2 [23] są podane w normach PN-EN 13381-4 [34], PN-EN 13381-8 [35] i w brytyjskim poradniku zwanym „yellow book” [6] uproszczone zasady wyznaczania wskaźników ekspozycji przekrojów otwartych i zamkniętych, z izolacją konturową i skrzynkową, przytoczone w tabelicach 9 i 10.



Tablica 9. Wskaźniki ekspozycji A_p/V przekrojów zabezpieczonych konturowo

Kształtownik stalowy	Zabezpieczenie konturowe przekroju		
	4-stronne	3-stronne	3-stronne częściowe
<p>Dwuteowniki (I lub H)</p>  $V = t_w(h - 2t_f) + 2(b \times t_f)$	$A_p = 4b + 2h - 2t_w$	$A_p = 3b + 2h - 2t_w$	$A_p = 2b + 2d - 2t_w$
	<p>2-stronne</p>  $A_p = 2b + h - t_w$	<p>1-stronne</p>  $A_p = b$	
<p>Teowniki</p>  $V = t_w(h - t_f) + (b \times t_f)$	<p>4-stronne</p>  $A_p = 2b + 2h$	<p>3-stronne</p>  $A_p = b + 2h$	<p>3-stronne</p>  $A_p = 2b + 2h - t_w$
			<p>3-stronne</p>  $A_p = 2b + 2h - t$
<p>Kątowniki</p>  $V = t(b + h)$	<p>4-stronne</p>  $A_p = 2b + 2h$	<p>3-stronne</p>  $A_p = b + 2h$	

Kształtownik stalowy	Zabezpieczenie konturowe przekroju		
	4-stronne	3-stronne	3-stronne
<p>Ceowniki</p>  $V = t(b + h)$	<p>4-stronne</p>  $A_p = 4b + 2h - 2t_w$	<p>3-stronne</p>  $A_p = 4b + h - 2t_w$	<p>3-stronne</p>  $A_p = 3b + 2h - 2t_w$
<p>Rury kwadratowe lub prostokątne</p>  $V = 2t_w + (b + h - 2t_w)q$	<p>4-stronne</p>  $A_p = 2b + 2h$	<p>3-stronne</p>  $A_p = b + 2h$	
<p>Rury okrągłe</p>  $V = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{d - 2t_w}{2} \right)$	<p>4-stronne</p>  $A_p = \pi d$		

PRZYKŁAD 3. WSKAŹNIK EKSPOZYCJI PRZEKROJU ZABEZPIECZONEGO KONTUROWO

Kształtownik HEB 450 – nagrzewany 4-stronnie, zabezpieczony konturowo
 Obwód nagrzewany = obwód całego przekroju $A_p = 2025 \text{ mm}$
 Pole przekroju poprzecznego $V = 218 \text{ cm}^2$
 Wskaźnik ekspozycji przekroju zabezpieczonego $A_p/V = 93 \text{ m}^{-1}$

Kształtownik IPE 120 – nagrzewany 3-stronnie (mocowany do stropu półką górną), zabezpieczony konturowo

Obwód nagrzewany = obwód całego przekroju – szerokość półki górnej

$$A_p = 475 - 64 = 411 \text{ mm}$$

Pole przekroju poprzecznego

$$V = 13,2 \text{ cm}^2$$

Wskaźnik ekspozycji przekroju zabezpieczonego konturowo

$$A_p / V = 312 \text{ m}^{-1}$$

Tablica 10. Wskaźniki ekspozycji A_p/V przekrojów zabezpieczonych skrzynkowo

Kształtownik stalowy	Zabezpieczenie skrzynkowe przekroju		
<p>Dwuteowniki (1 lub H)</p> $V = t_w(h - 2t_f) + 2(b \times t_f)$	<p>4-stronne</p> $A_p = 2b + 2h$	<p>3-stronne</p> $A_p = b + 2h$	<p>3-stronne częściowe</p> $A_p = b + 2d$
	<p>2-stronne</p> $A_p = b + h$	<p>1-stronne</p> $A_p = b$	
<p>Teowniki</p> $V = t_w(h - t_f) + (b \times t_f)$	<p>4-stronne</p> $A_p = 2b + 2h$	<p>3-stronne</p> $A_p = b + 2h$	<p>3-stronne</p> $A_p = b + 2h$
	<p>Kątowniki</p> $V = t(b + h)$	<p>4-stronne</p> $A_p = 2b + 2h$	<p>3-stronne</p> $A_p = b + 2h$

Kształtownik stalowy	Zabezpieczenie skrzynkowe przekroju		
<p>Ceowniki</p> $V = t(b + h)$	<p>4-stronne</p> $A_p = 2b + 2h$	<p>3-stronne</p> $A_p = 2b + h$	<p>3-stronne</p> $A_p = b + 2h$
	<p>Rury kwadratowe lub prostokątne</p> $V = 2t_w(b + h - 2t_w)$	<p>4-stronne</p> $A_p = 2b + 2h$	<p>3-stronne</p> $A_p = b + 2h$
<p>Rury okrągłe</p> $V = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{d - 2t_w}{2} \right)^2$	$A_p = \pi d$	<p>Uwaga: przyjęcie $A_p = 4d$ prowadzi do uzyskania wyższej wartości A_p/V niż w przypadku zabezpieczenia konturowego, co nie ma uzasadnienia w wynikach badań, w związku z czym należy przyjmować $A_p = \pi d$</p>	

PRZYKŁAD 4. WSKAŹNIK EKSPOZYCJI PRZEKROJU ZABEZPIECZONEGO SKRZYNKOWO

Kształtownik HEB 450 – nagrzewany 4-stronnie, zabezpieczony skrzynkowo

Obwód nagrzewany $A_p = 2b + 2h = 1500 \text{ mm}$

Pole przekroju poprzecznego $V = 218 \text{ cm}^2$

Wskaźnik ekspozycji przekroju zabezpieczonego $A_p/V = 69 \text{ m}^{-1}$

Kształtownik IPE 120 – nagrzewany 3-stronnie (mocowany do stropu półką górną), zabezpieczony skrzynkowo

Obwód nagrzewany $A_p = b + 2h = 304 \text{ mm}$

Pole przekroju poprzecznego $V = 13,2 \text{ cm}^2$

Wskaźnik ekspozycji przekroju zabezpieczonego skrzynkowo $A_p/V = 230 \text{ m}^{-1}$

4.4. Temperatura stali elementu nieosłoniętego

W przypadku równoważnego i równomiernego rozkładu temperatury w przekroju przyrost temperatury $\Delta\theta_{a,t}$ w przedziale czasu Δt w stalowym elemencie nieosłoniętym oblicza się według wzoru:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} h'_{net,d} \Delta t \quad (40)$$

gdzie:

- k_{sh} – współczynnik poprawkowy uwzględniający efekt zacienienia,
- A_m/V – wskaźnik ekspozycji przekroju elementów nieosłoniętych [$1/\text{m}$],
- A_m – pole powierzchni elementu na jednostkę długości [m^2/m],
- c_a – ciepło właściwe stali według rozdziału 3 [J/kgK],
- $h'_{net,d}$ – wartość obliczeniowa przyjętego strumienia ciepła określona na jednostkę powierzchni [W/m^2]; emisyjność w obliczeniach na ogół przyjmuje się równą: $\varepsilon_f = 1,0$ dla ognia, $\varepsilon_m = 0,7$ dla stali węglowych, $\varepsilon_m = 0,4$ dla stali nierdzewnych, a współczynnik konfiguracji $\Phi = 1,0$,
- Δt – przedział czasu [s], $\Delta t \leq 5 \text{ s}$,
- ρ_a – gęstość masy stali według rozdziału 3 [kg/m^3], równa 7850 kg/m^3 .

W przypadku przekrojów dwuteowych nieosłoniętych narażonych na oddziaływanie pożaru nominalnego (rozdz. 2) istnieje możliwość uwzględnienia efektu zacienienia zgodnie ze wzorem (41), przy czym jego pominięcie (przyjęcie $k_{sh} = 1,0$) prowadzi do uzyskania wyników po stronie bezpiecznej. W przypadku przekrojów o kształcie wypukłym (np. przekroje rurowe prostokątne i okrągłe) oraz w całości ogarniętych pożarem, efekt zacienienia nie odgrywa roli i w konsekwencji należy przyjąć współczynnik korekcyjny $k_{sh} = 1,0$. Efekt zacienienia zilustrowano na rysunku 20.

$$k_{sh} = \begin{cases} 0,9(A_m/V)_b \\ A_m/V \\ (A_m/V)_b \\ A_m/V \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{dla przekrojów dwuteowych} \\ \\ \text{dla pozostałych przypadków} \end{matrix} \quad (41)$$

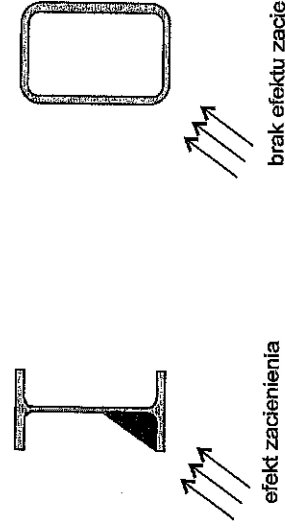
gdzie:

- A_m/V – wskaźnik ekspozycji przekroju elementów nieosłoniętych [$1/\text{m}$], $A_m/V \geq 10 \text{ m}^{-1}$,
- $[A_m/V]_b$ – wskaźnik ekspozycji przekroju, jak dla umownego przekroju skrzynkowego.

Przekształcając równanie (42) można posługiwać się wskaźnikiem ekspozycji przekroju nieosłoniętego z uwzględnieniem efektu zacienienia, który wynosi 0,9 lub 1,0 wskaźnika ekspozycji przekroju, jak dla umownego przekroju skrzynkowego, który jest łatwiejszy w obliczeniu:

$$k_{sh}(A_m/V) = 0,9(A_m/V)_b \quad \text{dla przekrojów dwuteowych} \quad (42)$$

$$k_{sh}(A_m/V) = 1,0(A_m/V)_b \quad \text{dla pozostałych przypadków}$$



Rys. 20. Wpływ kształtu przekroju na efekt zacienienia

W przykładzie 5 pokazano tok obliczeniowy dla kształtownika HEB 450 wykonanego ze stali węglowej, nagrzewanego 4-stronnie zgodnie z nominalną krzywą standardową temperatura-czas. Warto zauważyć, iż nawet tak masywny kształtownik, niezabezpieczony ogniochronnie już w 17. minucie osiągnął temperaturę stali równą 496°C , co przy konserwatywnym założeniu temperatury krytycznej na poziomie 500°C oznaczałoby utratę funkcji nośnej tego elementu.

5. ODPORNOŚĆ OGNIOWA ELEMENTÓW STALOWYCH

WEDŁUG PN-EN 1993-1-2

5.1. Metody oceny

W Eurokodach dopuszczono różne metody projektowania i obliczeniowej oceny odporności ogniowej, pozwalające w warunkach pożarowych zweryfikować stan graniczny nośności. Procedury obliczeń i oceny mogą mieć różny poziom złożoności, w zależności od:

- charakteru przyjętych oddziaływań termicznych: pożar standardowy (N) lub parametryczny (P),
- złożoności analizowanej konstrukcji (element – podzespół – cała konstrukcja),
- dokładności założeń dotyczących zachowania konstrukcji w warunkach pożaru.

Schemat metod projektowania i oceny podano w tablicy 14. Krzyżkiem zaznaczono dopuszczoną kombinację metody oceny oraz kategorii złożoności konstrukcji.

Tablica 14. Metody oceny

Metoda	Dane tabelaryczne	Proste modele obliczeniowe	Zaawansowane modele obliczeniowe
Analiza			
Elementu	–	x (N lub P)	x (N lub P)
Podzespołu	–	–	x (N lub P)
Globalna	–	–	x (N lub P)

Wykorzystywanie modelu pożaru parametrycznego (P) nie jest obecnie zalecane w myśl postanowień załącznika krajowego do normy PN-EN 1991-1-2 [19].

W myśl załącznika krajowego do normy PN-EN 1993-1-2 [23] ewentualna decyzja co do stosowania zaawansowanych modeli obliczeniowych powinna zostać również uzgodniona między inwestorem i projektantem już na etapie założeń projektowych.

Zaleca się korzystanie przede wszystkim z prostych modeli obliczeniowych przy uwzględnieniu ostrożnych założeń projektowych (np. pożar standardowy). Zaawansowane modele obliczeniowe powinny być stosowane w szczególnych przypadkach, przede wszystkim, gdy wykorzystuje się również zasady inżynierii bezpieczeństwa pożarowego.

Warto zaznaczyć również, iż zgodnie z PN-EN 1991-1-2 [19], przyjmując standardowe warunki pożarowe, nie wymaga się uwzględniania oddziaływań pośrednich od elementów przylegających, np. wydłużenia termicznego elementów przylegających, mogącego wpływać na siły wewnętrzne analizowanego elementu.

W Eurokodach dopuszczono także ocenę odporności ogniowej na podstawie wyników badań, zgodnie z normami serii PN-EN 1363, PN-EN 1364, PN-EN 1365 oraz PN-EN 1381. W odniesieniu do konstrukcji stalowych istotne są trzy normy dotyczące badania odporności ogniowej elementów nośnych: PN-EN 1363-1 [14], zawierająca wymagania ogólne, PN-EN 1365-3 [15] i PN-EN 1365-4 [16], określające procedury badawcze odpowiednio dla belek i słupów. Dodatkowo stosuje się normy PN-EN 13381-4 [35] i PN-EN 13381-8 [36] do określania skuteczności systemów ognioochronnych służących do zabezpieczania konstrukcji stalowych. Informacje na ten temat podano w punkcie 3.4 i rozdziale 6.

Wspomniane wcześniej metody obliczeniowe mają zastosowanie do:

- konstrukcji lub elementów składowych konstrukcji, które objęte są postanowieniami normy PN-EN 1993-1-1 [22] i według niej projektowane,
- kształtowników giętych i blach profilowanych na zimno, objętych postanowieniami PN-EN 1993-1-3 [24],
- elementów oraz blach poszycia wykonanych ze stali nierdzewnej, objętych postanowieniami PN-EN 1993-1-4 [25],
- gatunków stali konstrukcyjnej S235, S275, S355, S420 i S460 według PN-EN 10025 oraz wszystkich gatunków według PN-EN 10210 i PN-EN 10219,
- innych gatunków stali, pod warunkiem że właściwości materiału w podwyższonej temperaturze są dostępne i określone na podstawie zharmonizowanych norm europejskich,
- konstrukcji stalowych, wobec których wymaga się zachowania nośności ogniowej w celu uniknięcia przedwczesnego zawalenia się obiektu; nie dotyczy elementów oddzielających (np. ścian lub przegród dymowych).

Elementy stalowo-betonowe objęte są normą PN-EN 1994-1-2 [29], a elementy aluminiowe PN-EN 1999-1-2 [30].

5.2. Proste modele obliczeniowe

5.2.1. Postanowienia ogólne

Stosowanie prostych modeli obliczeniowych skupia się na trzech możliwych dziedzinach oceny nośności ogniowej elementów:

- wytrzymałościowej,
- czasowej,
- temperaturowej.

W dziedzinie **wytrzymałościowej** należy przyjąć, że funkcja nośna elementu stalowego w warunkach pożaru jest zachowana po upływie czasu t , jeżeli spełniony jest warunek:

$$E_{R,t} \leq R_{R,t} \quad (50)$$

gdzie:

- $E_{R,t}$ – wartość obliczeniowa efektu oddziaływań w pożarowej sytuacji projektowej, wyznaczona zgodnie z PN-EN 1991-1-2 [19] (p. 2.3),
- $R_{R,t}$ – odpowiednia obliczeniowa nośność elementu stalowego w pożarowej sytuacji projektowej w czasie trwania pożaru t .

Obliczeniową nośność $R_{R,t}$ w czasie trwania pożaru t wyznacza się zazwyczaj, przyjmując hipotezę równomierniej temperatury w przekroju (rozdz. 4) i stosując modyfikację obliczeniowej nośności w normalnej temperaturze wyznaczonej według PN-EN 1993-1-1 [22], polegającą na uwzględnieniu właściwości mechanicznych stali w podwyższonych temperaturach (rozdz. 3).

Przyjmując nierównomierny rozkład temperatury, obliczeniową nośność w normalnej temperaturze wyznaczoną według PN-EN 1993-1-1 [22] modyfikuje się odpowiednio do przyjętego rozkładu temperatury. Sposób wyznaczania $R_{R,t}$ w zależności od klasy przekroju i rodzaju sił wewnętrznych przedstawiono w dalszej części tego rozdziału (p. od 5.2.3 do 5.2.8).

Podejście „wytrzymałościowe” można stosować bez potrzeby stosowania zaawansowanych modeli obliczeniowych, a same obliczenia można wykonywać ręcznie.

W dziedzinie **czasowej** porównuje się okres, przez który element konstrukcji stalowej zachowa nośność ogniową z wymaganym okresem odporności ogniowej, co sprawdza się z następującego warunku:

$$t_{R,t} \leq t_{R,req} \quad (51)$$

gdzie:

- $t_{R,t}$ – obliczeniowy okres nośności ogniowej,
 - $t_{R,req}$ – wymagany okres odporności ogniowej.
- W praktyce bezpośrednio zastosowanie podejścia „czasowego” możliwe jest za-
zwyczajaj jedynie przy wykorzystaniu zaawansowanych modeli obliczeniowych (p. 5.3).

W dziedzinie **temperaturowej** porównuje się temperaturę stali po zadanim czasie trwania pożaru z temperaturą krytyczną danego elementu stalowego

$$\theta_{a,t} \leq \theta_{a,c} \quad (52)$$

gdzie:

- $\theta_{a,c}$ – temperatura krytyczna stali,
- $\theta_{a,t}$ – temperatura stali w czasie trwania pożaru t .

Jest to najbardziej popularne podejście oceny nośności ogniowej elementów konstrukcji stalowych. Temperaturę stali elementów oblicza się według rozdziału 4, a temperaturę krytyczną według punktu 5.2.10.

Podejście to jest o tyle uniwersalne, że nawet jeśli warunek nie zostanie spełniony, to mając wyznaczoną temperaturę krytyczną stali, dobór systemu zabezpieczenia ogniochronnego sprowadza się do odczytania grubości izolacji z aprobaty technicznej wyrobu lub innego dokumentu odniesienia.

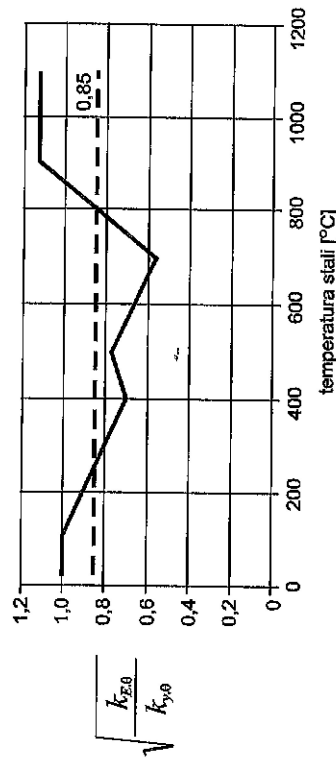
5.2.2. Klasyfikacja przekrojów

Stosując proste modele obliczeniowe, przekroje poprzeczne można klasyfikować jak w obliczeniach przy normalnej temperaturze (20°C), zgodnie z PN-EN 1993-1-1 [22], lecz z uwzględnieniem zredukowanej wartości ε według wzoru:

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (53)$$

gdzie f_y to granica plastyczności w temperaturze 20°C.

Stała 0,85 to przedstawiony na rysunku 25 wynik uproszczenia wartości stosunku modułu sprężystości Younga i granicy plastyczności $\sqrt{k_{E,0}/k_{y,0}}$ w podwyższonych temperaturach, jak dla stali węglowej. Obliczenia zilustrowano przykładem 9.



Rys. 25. Stosunek $\sqrt{k_{E,0}/k_{y,0}}$ w podwyższonych temperaturach

PRZYKŁAD 9. KLASA PRZEKROJU W WARUNKACH NORMALNYCH I POŻAROWYCH

Śłup HEA 240 – ściskany osiowo, ze stali S355

Granica plastyczności w temperaturze 20°C

$$f_y = 355 \text{ MPa}$$

Klasa przekroju w warunkach normalnych

Współczynnik ε w warunkach normalnych

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

Środek ściskany

$$\frac{c}{t} = \frac{d}{t_w} = \frac{164}{7,5} = 21,9 < 33\varepsilon = 26,8 \rightarrow \text{klasa 1}$$

Pas ściskany

$$\frac{c}{t} = \frac{b - t_w - 2r}{2t_f} = \frac{240 - 7,5 - 2 \times 21}{2 \times 2} = 7,94 < 10\varepsilon = 8,1 \rightarrow \text{klasa 2}$$

Przekrój spełnia warunki przekroju klasy 2 (warunki normalne).

Klasa przekroju w warunkach pożarowych

Współczynnik ε w warunkach pożarowych

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,69$$

Środek ściskany

$$\frac{c}{t} = \frac{d}{t_w} = \frac{164}{7,5} = 21,9 < 33\varepsilon = 22,8 \rightarrow \text{klasa 1}$$

Pas ściskany

$$\frac{c}{t} = \frac{b - t_w - 2r}{2t_f} = \frac{240 - 7,5 - 2 \times 21}{2 \times 2} = 7,94 < 14\varepsilon = 9,7 \rightarrow \text{klasa 3}$$

Przekrój spełnia warunki przekroju klasy 3 (warunki pożarowe).

5.2.3. Nośność elementów rozciąganych

Obliczeniowa nośność $N_{f,0,Rd}$ elementu rozciąganego o równomiernej temperaturze θ_a jest określona wzorem:

$$N_{f,0,Rd} = k_{y,\theta} N_{Rd} \frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,\theta}} \quad (54)$$

gdzie:

$k_{y,\theta}$ – współczynnik redukcyjny granicy plastyczności stali w temperaturze θ_a osiągniętej w czasie trwania pożaru t (rozdz. 3),

N_{Rd} – obliczeniowa nośność przekroju równa $N_{pl,Rd}$ w normalnej temperaturze według PN-EN 1993-1-1 [22],

$\gamma_{M,0}$ – współczynnik częściowy dotyczący nośności przekroju poprzecznego równy 1,00,

$\gamma_{M,\theta}$ – współczynnik częściowy dotyczący właściwości materiału w sytuacji pożarowej, który w odniesieniu do właściwości mechanicznych stali przyjmuje się według załącznika krajowego (wartość zalecana 1,00).

W przypadku nierównomiernego rozkładu temperatury w przekroju, obliczeniową nośność $N_{f,t,Rd}$ elementu rozciąganego można wyznaczyć według wzoru:

$$N_{f,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i k_{y,\theta,i} \frac{f_y}{\gamma_{M,\theta}} \quad (55)$$

gdzie:

A_i – elementarne pole przekroju z temperaturą θ_i ,

$k_{y,\theta,i}$ – współczynnik redukcyjny granicy plastyczności w temperaturze θ_i osiągniętej w czasie trwania pożaru t (rozdz. 3),

θ_i – temperatura w elementarnym polu A_i ,

Obliczeniową nośność $N_{f,t,Rd}$ w przekroju o nierównomiernym rozkładzie temperatury stali można obliczać alternatywnie według wzoru (54) – jak dla elementu o równomiernym rozkładzie temperatury, przyjmując temperaturę stali θ_a równą najwyższej temperaturze $\theta_{a,max}$ osiągniętej w czasie trwania pożaru t . Powyższe uproszczenie daje wynik mniej korzystny, tj. ocenę bezpieczeństwa po stronie bezpiecznej. Obliczenia pokazano w przykładzie 10.

PRZYKŁAD 10. NOŚNOŚĆ ELEMENTU ROZCIĄGANEGO W SYTUACJI POŻAROWEJ

Kształtownik HEB 450 – nagrzewany 4-stronnie, ze stali węglowej klasy S235, nieosłonięty

Granica plastyczności stali w temperaturze 20°C

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

Pole przekroju poprzecznego

$$A = 218 \text{ cm}^2$$

Obliczeniowa nośność przekroju na rozciąganie w temperaturze normalnej według PN-EN 1993-1-1

$$N_{Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,0218 \times 235}{1,00} \times 10^3 = 5123 \text{ kN}$$

Temperaturę stali θ_a obliczono zgodnie z punktem 4.4. Przyjęto równomierny rozkład temperatury w całym elemencie.

Współczynnik redukcyjny granicy plastyczności stali $k_{y,\theta}$ odczytano z tablicy 3 (p. 3.1.1).

Obliczone wartości nośności elementu na rozciąganie w czasie trwania pożaru zestawiono w tablicy 15.

Tablica 15. Nośność elementu rozciąganego w czasie trwania pożaru t

t [min]	θ_a [°C]	$k_{y,\theta}$ [-]	$N_{f,\theta,Rd}$ [kN]
0	20	1,000	5123
5	124	1,000	5123
10	283	1,000	5125
15	440	0,912	4672
20	570	0,563	2884
25	666	0,312	1598
30	725	0,200	1025

5.2.4. Nośność elementów ściskanych o przekrojach klasy 1, 2 lub 3

Obliczeniowa nośność na wyboczenie $N_{b,f,\theta,Rd}$ elementów ściskanych o przekroju klasy 1, 2 lub 3 i równomierniej temperaturze θ_a w czasie trwania pożaru t jest określona wzorem:

$$N_{b,f,\theta,Rd} = \chi_{f,\theta} A k_{y,\theta} \gamma_{M,f} f_y \quad (56)$$

gdzie $\chi_{f,\theta}$ to współczynnik wyboczenia giętnego w pożarowej sytuacji projektowej, jako mniejsza z wartości $\chi_{y,\theta}$ i $\chi_{z,\theta}$ obliczana według wzoru:

$$\chi_{f,\theta} = \frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{\phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad (57)$$

przy czym:

$$\phi_{\theta} = \frac{1}{2} \left(1 + \alpha \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2 \right) \quad (58)$$

gdzie:

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (59)$$

smukłość względna przy wyboczeniu $\bar{\lambda}$ w temperaturze θ_a :

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \left(\frac{k_{y,\theta}}{k_{z,\theta}} \right)^{0,5} \quad (60)$$

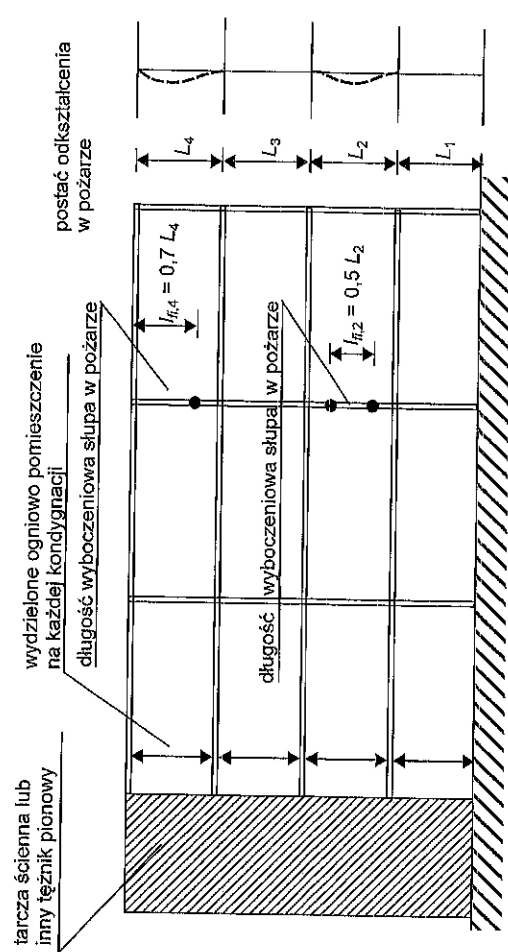
- $k_{y,\theta}$ – współczynnik redukcyjny granicy plastyczności stali w temperaturze θ_a osiągniętej w czasie trwania pożaru t (rozdz. 3),
- $k_{z,\theta}$ – współczynnik redukcyjny modułu sprężystości liniowej stali w temperaturze θ_a osiągniętej w czasie trwania pożaru t (rozdz. 3),
- $\gamma_{M,f}$ – współczynnik częściowy dotyczący właściwości materiału w sytuacji pożarowej, który w odniesieniu do właściwości mechanicznych stali przyjmuje się według załącznika krajowego (wartość zalecana 1,00).

Długość wyboczeniową słupa l_f w pożarowej sytuacji projektowej na ogół określa się tak, jak w sytuacji normalnej z uwzględnieniem poniższych zaleceń:

- w stężonych układach ramowych można wyznaczać przy założeniu nieprzesuwności węzłów ograniczających ognioowo, pod warunkiem że odporność ogniowa elementów oddzielających te pomieszczenia jest nie mniejsza niż odporność ogniowa słupa,

- w przypadku ramy stężonej, w której każda kondygnacja stanowi wydzielone ognioowo pomieszczenia długość wyboczeniową słupa ciągłego można przyjąć jako $l_f = 0,5 L$ dla kondygnacji pośredniej oraz jako $l_f = 0,7 L$ dla kondygnacji najwyższej, gdzie L jest odpowiednią długością teoretyczną słupa rozpatrywanej kondygnacji (rys. 26).

Podane zalecenia odnoszą się do wyboczenia giętnego słupów szkieletów nieprzechyłowych.



Rys. 26. Długości wyboczeniowe słupów l_f w ramach stężonych