



Program Uczenie się przez całe życie

Projekt SKILLS



PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH Z UWAGI NA WARUNKI POŻAROWE



Program
Uczenie się
przez całe życie

EFEKTY KSZTAŁCENIA – CELE NINIEJSZEJ PREZENTACJI

- Celem niniejszej prezentacji jest dostarczenie niezbędnych informacji dotyczących obliczania i projektowania stalowych konstrukcji budowlanych z uwzględnieniem oddziaływań występujących w nadzwyczajnej sytuacji projektowej, jaką jest pożar.
- Treści merytoryczne zawarte w prezentacji mogą zainteresować zarówno osoby zaangażowane zawodowo w procesy inwestycyjne – inwestorów, projektantów i wykonawców, jak również odpowiednie władze, odpowiedzialne za zapewnienie bezpieczeństwa pożarowego budynków i budowli.

Zawartość

- **Wprowadzenie**
- **Podstawy projektowania**
 - ✓ Metody oceny konstrukcji
 - ✓ Oddziaływania i obciążenia (termiczne i mechaniczne)
 - ✓ Obliczeniowe właściwości materiału
- **Właściwości materiałowe**
- **Ocena odporności pożarowej**
 - ✓ Uwagi ogólne
 - ✓ Metody uproszczone – proste modele obliczeniowe
 - ✓ Zaawansowane modele obliczeniowe
- **Przykłady obliczeń**
 - ✓ Słup ściskany osiowo
 - ✓ Belka zginana i ściskana
 - ✓ Belka o przekroju wykonanym z profilu zamkniętego
- **Podsumowanie**
- **Literatura**

WPROWADZENIE



Program
Uczenie się
przez całe życie

WPROWADZENIE – WYMAGANIA PODSTAWOWE

- Obiekty budowlane muszą być zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby w przypadku pożaru:
 - ✓ Nośność konstrukcji mogła być zapewniona przez założony okres czasu
 - ✓ Powstawanie i rozprzestrzenianie się ognia i dymu w obiektach było ograniczone
 - ✓ Rozprzestrzenianie się ognia na sąsiednie obiekty było ograniczone
 - ✓ Użytkownicy mogli opuścić zagrożony obiekt lub mogli być uratowani w inny sposób
 - ✓ Uwzględnione było bezpieczeństwo ekip ratowniczych

WPROWADZENIE – ODPORNOŚĆ POŻAROWA

- Odporność pożarowa została zdefiniowana w domenie czasowej jako wielkość charakteryzująca:
 - Odpowiedni czas działania ognia, w którym dana funkcja odporności ogniowej konstrukcji jest zachowana pomimo występowania oddziaływań pożarowych
- Zgodnie z normą europejską, przyjęto 3 kryteria do określania/opisu odporności pożarowej elementów konstrukcji:
 - ✓ **R** – kryterium nośności pożarowej
 - ✓ **E** – kryterium szczelności pożarowej przegrody
 - ✓ **I** – kryterium izolacyjności termicznej przegrody
- Spełnienie powyższych kryteriów w stosunku do przegród budowlanych może być wymagane oddzielnie lub łącznie, np.:
 - tylko zapewnienie skutecznego oddzielenia pożarowego: kryterium szczelności (**E**) i - jeśli wymagane- kryterium izolacyjności (**I**)
 - tylko zapewnienie funkcji nośnej: kryterium nośności (**R**)
 - równoczesne zapewnienie funkcji oddzielającej i nośnej: kryteria **R**, **E** oraz - jeśli wymagane - kryterium **I**

WPROWADZENIE – ODPORNOŚĆ POŻAROWA

➤ **R** – nośność w warunkach pożaru

Zdolność konstrukcji do zachowania przez określony okres czasu odpowiedniej funkcji nośnej przy określonym poziomie obciążeń w przypadku wystąpienia wyjątkowej sytuacji pożaru

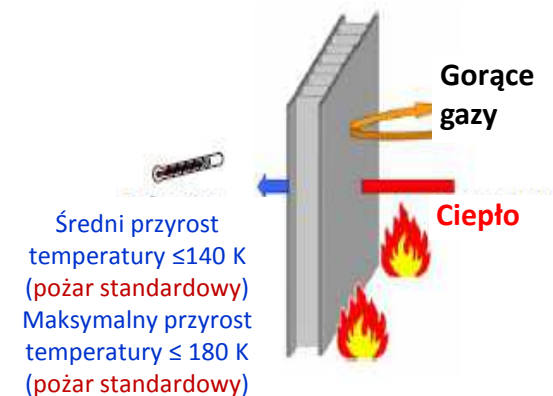
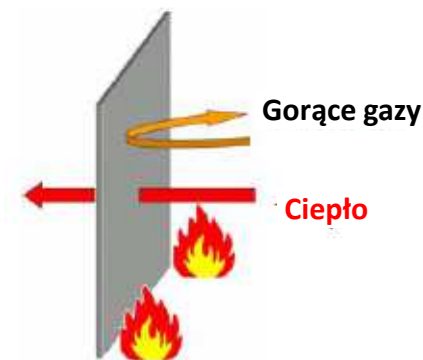
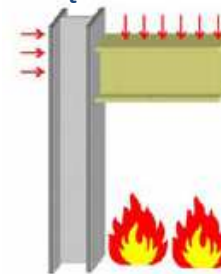
➤ **E** – szczelność ogniowa/pożarowa

Zdolność przegród budynku do zachowania przez określony okres czasu odpowiedniej funkcji oddzielającej dla gorących gazów, płomieni i dymu

➤ **I** – izolacyjność termiczna

Zdolność przegród budowlanych do zachowania przez określony okres czasu odpowiedniej funkcji oddzielającej, polegającej na nieprzekroczeniu granicznej wartości temperatury po drugiej stronie przegrody

Obciążenia mechaniczne



WPROWADZENIE – ZAKRES NORMY PN-EN 1993-1-2

- Obejmuje wyłącznie wymagania dotyczące nośności, użytkowości, trwałości i odporności ogniowej konstrukcji stalowych
- Znajduje zastosowanie przy projektowaniu konstrukcji lub elementów konstrukcji objętych normą PN-EN 1993-1 i wg niej projektowanych
- Powinna być stosowana w powiązaniu z normami PN-EN 1991-1-2 oraz PN-EN 1993-1-1
- Zawiera reguły dodatkowe i uzupełniające w stosunku do reguł projektowania w normalnej temperaturze otoczenia
- Obejmuje jedynie bierne metody zabezpieczeń przeciwpożarowych
- Podane metody obliczeniowe mają zastosowanie do:
 - ✓ Stali konstrukcyjnych gatunków: S235, S275, S355, S420 i S460 wg PN-EN 10025 oraz wszystkich gatunków wg PN-EN 10210 i PN-EN 10219
 - ✓ Elementów wykonanych z kształtowników giętych i blach profilowanych na zimno, objętych postanowieniami PN-EN 1993-1-3
 - ✓ Elementów oraz blach poszycia wykonanych ze stali nierdzewnej i objętych postanowieniami PN-EN 1993-1-4

PODSTAWY PROJEKTOWANIA



Program
Uczenie się
przez całe życie

➤ Postanowienia ogólne

Dla odpowiedniego okresu ekspozycji pożarowej t , ogólny warunek nośności określony jest wzorem:

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t}$$

$E_{fi,d}$: wartość obliczeniowa efektu oddziaływań w sytuacji pożarowej (wg PN-EN 1991-1-2), z uwzględnieniem termicznych efektów rozszerzalności i deformacji

$R_{fi,d,t}$: odpowiednia nośność obliczeniowa w sytuacji pożarowej (wg PN-EN 1993-1-2)

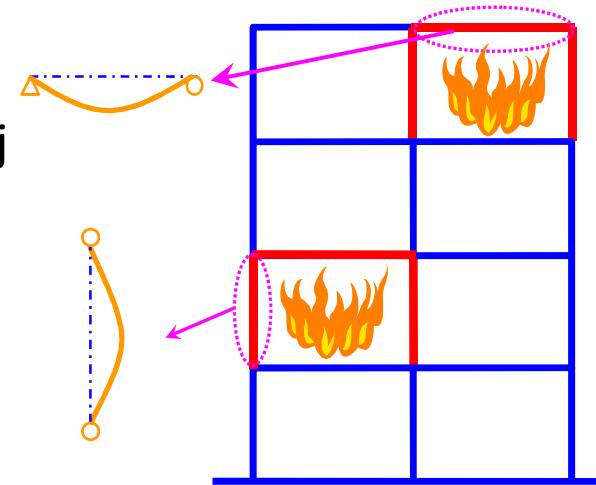
➤ Różne poziomy i modele analizy konstrukcji

- ✓ Globalna analiza konstrukcji
- ✓ Analiza podukładu konstrukcji
- ✓ Analiza elementu

PODSTAWY PROJEKTOWANIA – METODY WERYFIKACJI

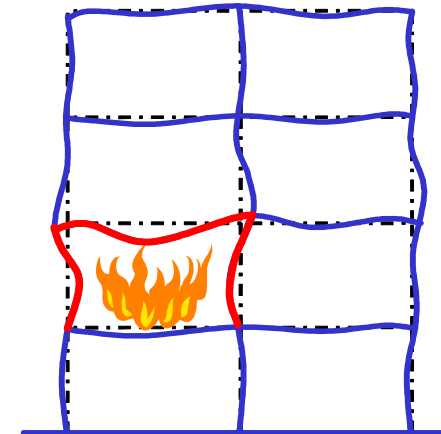
➤ Analiza elementu

- ✓ niezależna analiza konstrukcji
 - efekt wynikający z rozszerzalności termicznej może być pominięty
- ✓ prosta do zastosowania
- ✓ znajduje zastosowanie dla warunków tzw. pożaru nominalnego



➤ Analiza podukładu lub całej konstrukcji

- ✓ wzajemne oddziaływania pomiędzy różnymi elementami konstrukcji powinny być wzięte pod uwagę
- ✓ uwzględnia wpływ przegród oddzielenia pożarowego/podziału budynku na strefy
- ✓ uwzględnia globalną stateczność konstrukcji

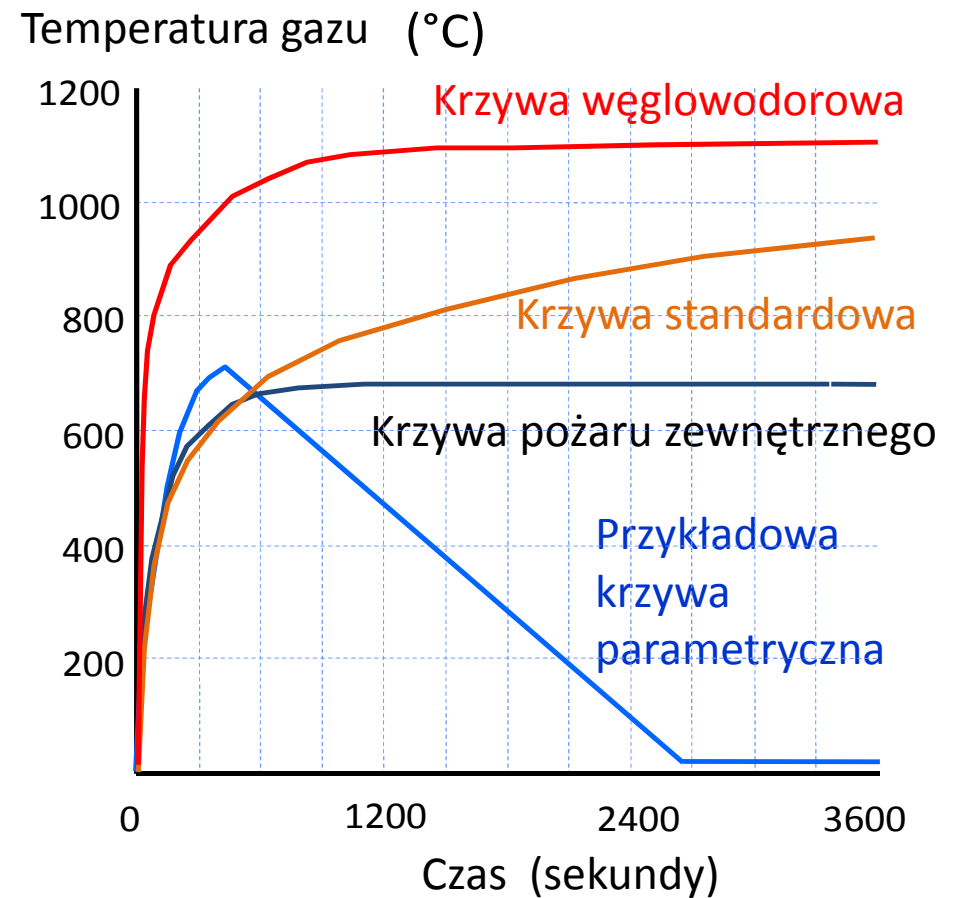


ODDZIAŁYWANIA TERMICZNE W WARUNKACH POŻARU

➤ Oddziaływania termiczne

- ✓ Nominalne modele pożaru
- ✓ Naturalne modele pożaru

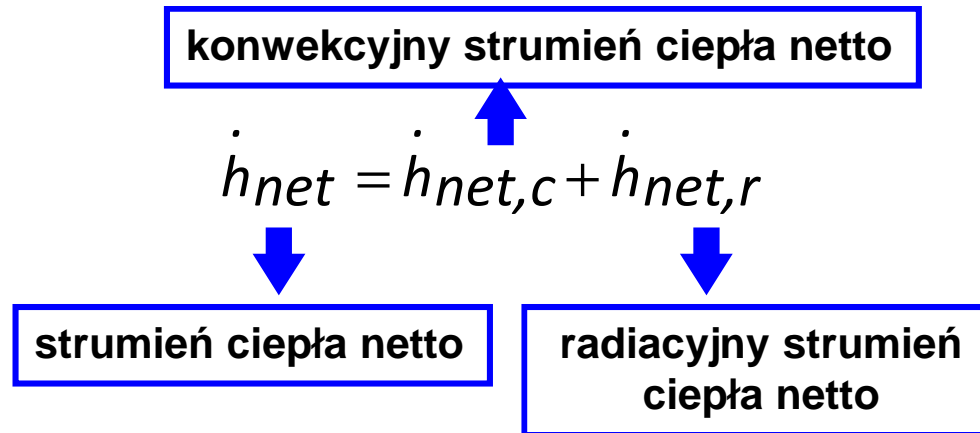
PN-EN 1991-1-2 § 3



ODDZIAŁYWANIA TERMICZNE W WARUNKACH POŻARU

PN-EN 1991-1-2 § 3.1

- Strumień ciepła netto na powierzchni poddane działaniu ognia



- ✓ Konwekcyjny strumień ciepła netto:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_m &= 0.7 && \text{dla stali węglowych} \\ \varepsilon_m &= 0.4 && \text{dla stali nierdzewnych} \end{aligned}$$

- ✓ Radiacyjny strumień ciepła netto:

$$\dot{h}_{net,r} = 5.67 \times 10^{-8} \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \left((\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right)$$

ZASADY KOMBINACJI OBCIĄŻEŃ

➤ Kombinacje oddziaływań mechanicznych

PN-EN 1991-1-2 § 4.3.1

- ✓ Dla wyjątkowych sytuacji obliczeniowych (PN-EN 1990)

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + (\Psi_{1,1} \text{ lub } \Psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

$G_{k,j}$: wartość charakterystyczna oddziaływania stałego „j”

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

$Q_{k,i}$: wartości charakterystyczne towarzyszących oddziaływań zmiennych

$\Psi_{1,1}$: współczynnik dla wartości częstej wiodącego oddziaływania zmiennego

$\Psi_{2,i}$: współczynnik dla wartości prawie stałej towarzyszących oddziaływań zmiennych

(stosowanie $\Psi_{2,1}$ lub $\Psi_{1,1}$ powinno być podane w załączniku krajowym – zaleca się stosowanie $\Psi_{2,1}$).

PODSTAWY PROJEKTOWANIA - ODDZIAŁYWANIA

Oddziaływania	ψ_1	ψ_2
Obciążenia zmienne w budynkach, kategoria (patrz PN-EN 1991-1-1)		
Kategoria A : powierzchnie mieszkalne	0.5	0.3
Kategoria B : powierzchnie biurowe	0.5	0.3
Kategoria C : miejsca zebrań	0.7	0.6
Kategoria D : powierzchnie handlowe	0.7	0.6
Kategoria E : powierzchnie magazynowe	0.9	0.8
Kategoria F : powierzchnie ruchu pojazdów ciężar pojazdu ≤ 30 kN	0.7	0.6
Kategoria G : powierzchnie ruchu pojazdów, 30 kN < ciężar pojazdu ≤ 160 kN	0.5	0.3
Kategoria H : dachy	0.0	0.0
Obciążenie budynków śniegiem (patrz PN-EN 1991-1-3)		
Finlandia, Islandia, Norwegia, Szwecja	0.50	0.20
Pozostałe kraje CEN, miejscowości położone na wysokości $H > 1000$ m powyżej poziomu morza	0.50	0.20
Pozostałe kraje CEN, miejscowości położone na wysokości $H \leq 1000$ m powyżej poziomu morza	0.20	0.0
Obciążenie wiatrem (patrz PN-EN 1991-1-4)	0.2	0.0
Temperatura (nie pożarowa) w budynku (patrz PN-EN 1991-1-5)	0.5	0.0

➤ Efekty oddziaływań mechanicznych

- ✓ Dla uproszczenia efekty oddziaływań można ustalić na podstawie efektów wyznaczonych dla temperatury normalnej, z wykorzystaniem współczynnika redukcyjnego

η_{fi}

$$E_{fi,d,t} = (E_{fi,d,t=0} = E_{fi,d}) = \eta_{fi} E_d$$

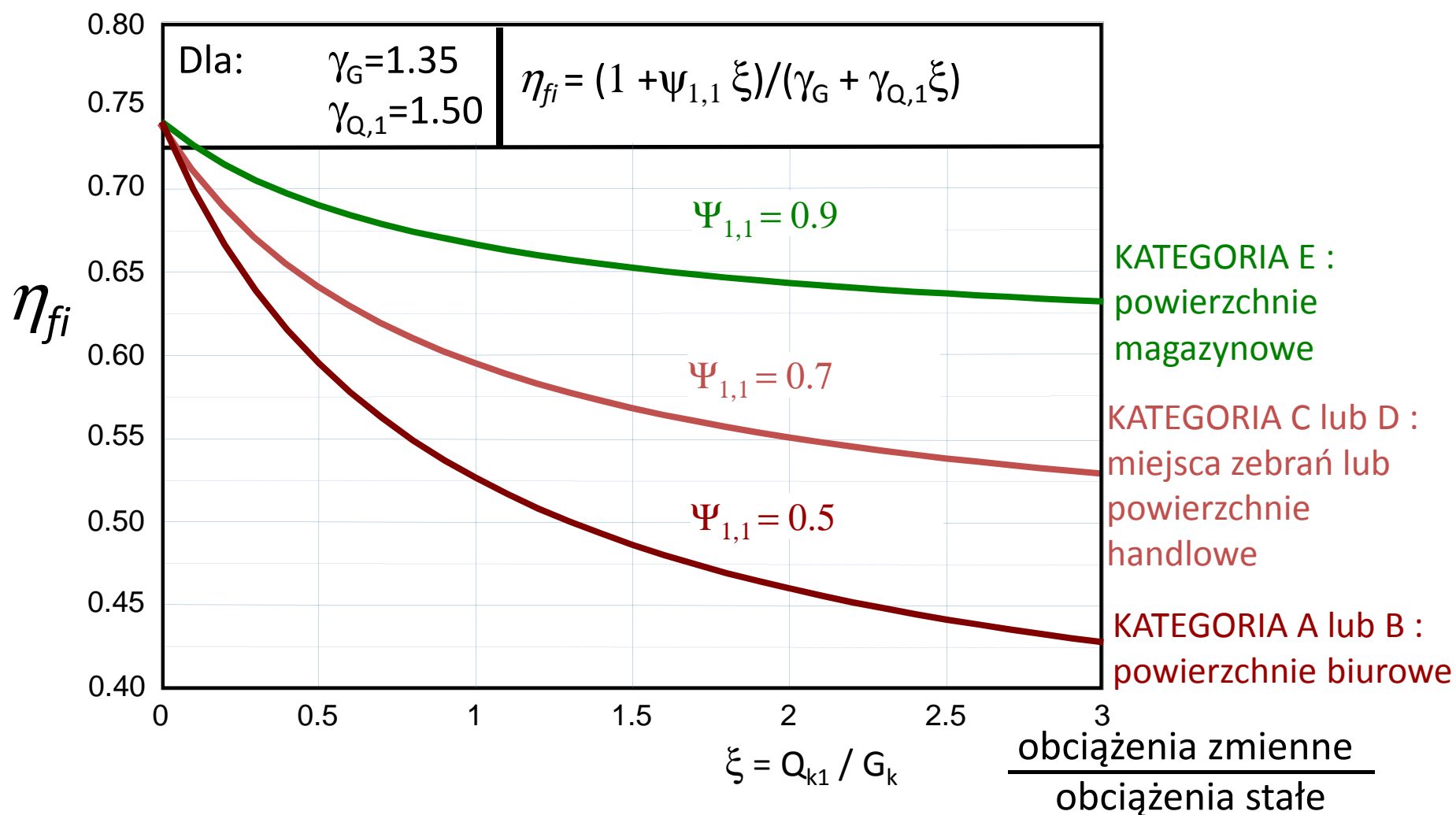
E_d : wartość obliczeniowa odpowiednich efektów oddziaływań według kombinacji podstawowej (zgodnie z PN-EN 1990)

$E_{fi,d,t}$: odpowiadająca stała wartość obliczeniowa efektów oddziaływań w sytuacji podstawowej (zgodnie z PN-EN 1991-1-2)

η_{fi} : współczynnik redukcyjny (rozumiany jako poziom obciążenia przy projektowaniu na warunki pożarowe)

PODSTAWY PROJEKTOWANIA - ODDZIAŁYWANIA

➤ Przykładowe wartości współczynnika redukcyjnego η_{fi}



OBLICZENIOWE WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH

- Właściwości mechaniczne (wytrzymałościowe i odkształceniowe):

$$X_{d,fi} = k_{\theta} X_k / \gamma_{M,fi} \quad \text{PN-EN 1993-1-2 § 2.3 (1)}$$

- ✓ X_k : wartość charakterystyczna właściwości wytrzymałościowej lub odkształceniowej w normalnej temperaturze wg PN-EN 1993-1-1
- ✓ k_{θ} : współczynnik redukcyjny do wyznaczania zależnych od temperatury parametrów wytrzymałościowych lub odkształceniowych materiału
- ✓ $\gamma_{M,fi}$: częściowy współczynnik bezpieczeństwa odnoszący się do sytuacji pożarowej

- Właściwości termiczne PN-EN 1993-1-2 § 2.3 (2)

Jeżeli zwiększenie danej wartości jest korzystne dla bezpieczeństwa:

$$X_{d,fi} = X_{k,\theta} / \gamma_{M,fi}$$

Jeżeli zwiększenie danej wartości jest niekorzystne dla bezpieczeństwa:

- ✓ $X_{k,\theta}$: wartość charakterystyczna danej właściwości, zależna od temperatury materiału $X_{d,fi} = \gamma_{M,fi} X_{k,\theta}$
- ✓ $\gamma_{M,fi}$: częściowy współczynnik bezpieczeństwa dotyczący rozpatrywanej właściwości materiału w sytuacji pożarowej

OBLICZENIOWE WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH

➤ Wartości częściowych współczynników bezpieczeństwa

Materiał	Projektowanie na warunki pożarowe	Projektowanie na warunki normalne (temperatura otoczenia)
Stalowe elementy konstrukcyjne	$\gamma_{M,fi} = 1,0$	$\gamma_{M,0} = 1,0$
Połączenia i węzły w konstrukcjach stalowych	$\gamma_{M,fi} = 1,0$	$\gamma_{M,2} = 1,25$

WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁOWE



Program
Uczenie się
przez całe życie

WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁOWE

- Przepisy normalizacyjne podają informacje dotyczące
 - ✓ Zmienności właściwości termicznych stali konstrukcyjnych w podwyższonych temperaturach, takich jak:
 - Wydłużenie termiczne
 - Ciepło właściwe
 - Przewodność cieplna
 - ✓ Zmienności właściwości mechanicznych, takich jak:
 - Zależność naprężenie-odkształcenie
 - Moduł sprężystości podłużnej (modułu Younga)
 - Granica plastyczności
- Rodzaje stali objęte postanowieniami normowymi:
 - ✓ Stale węglowe
 - ✓ Stale nierdzewne

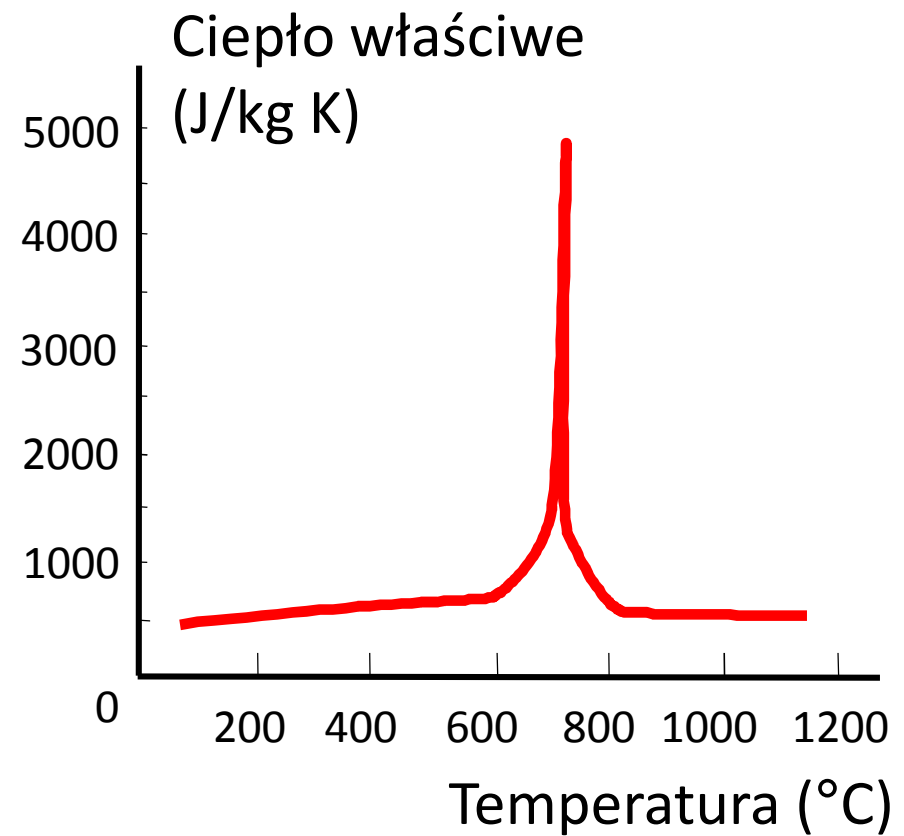
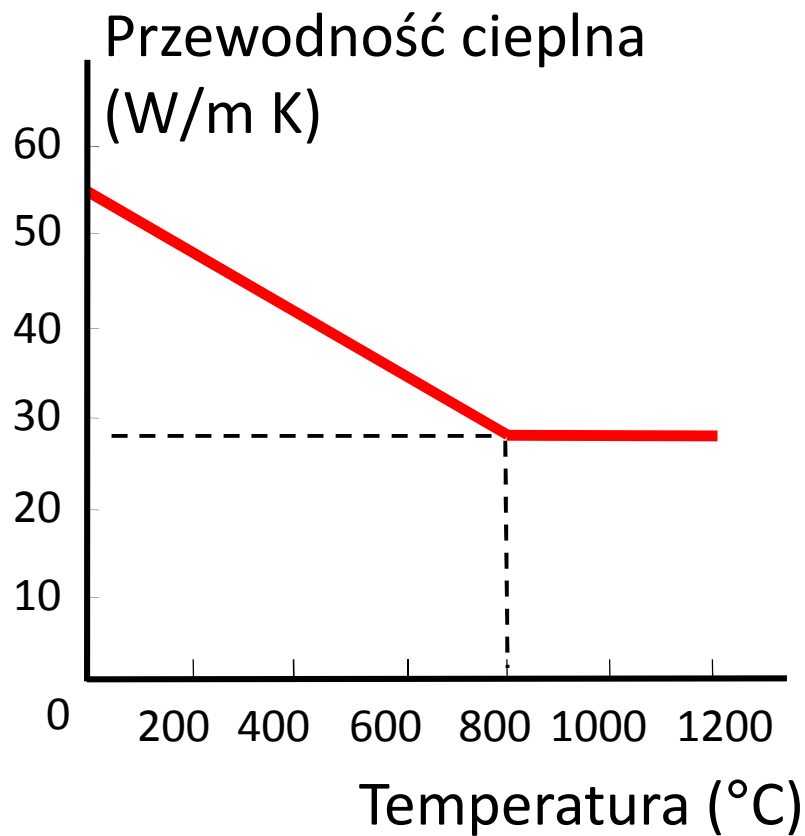
PN-EN 1993-1-2 § 3.4

PN-EN 1993-1-2 Załącznik C

WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁOWE – STALE WĘGLOWE

PN-EN 1993-1-2 § 3.4.1

- Właściwości termiczne w podwyższonych temperaturach

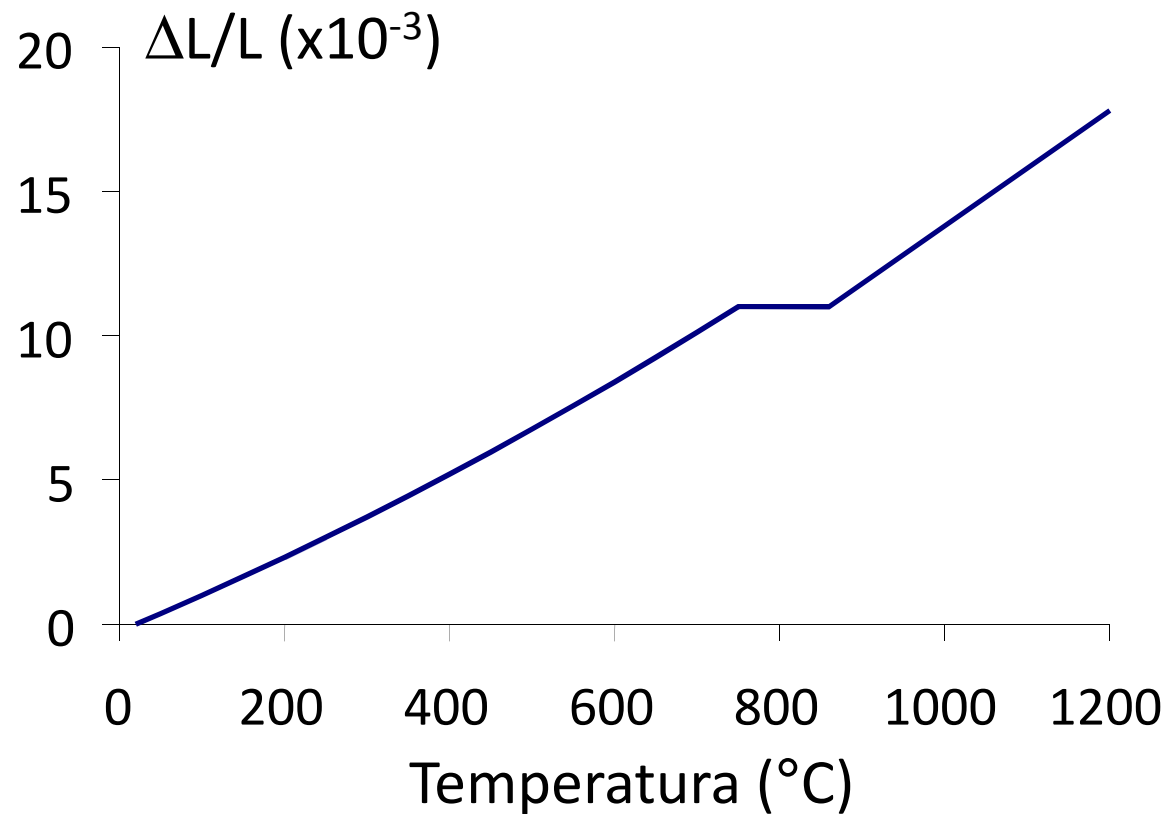


WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁOWE – STALE WĘGLOWE

- Gęstość masy 7850 kg/m³
- Względne wydłużenie termiczne

PN-EN 1993-1-2 § 3.2.2

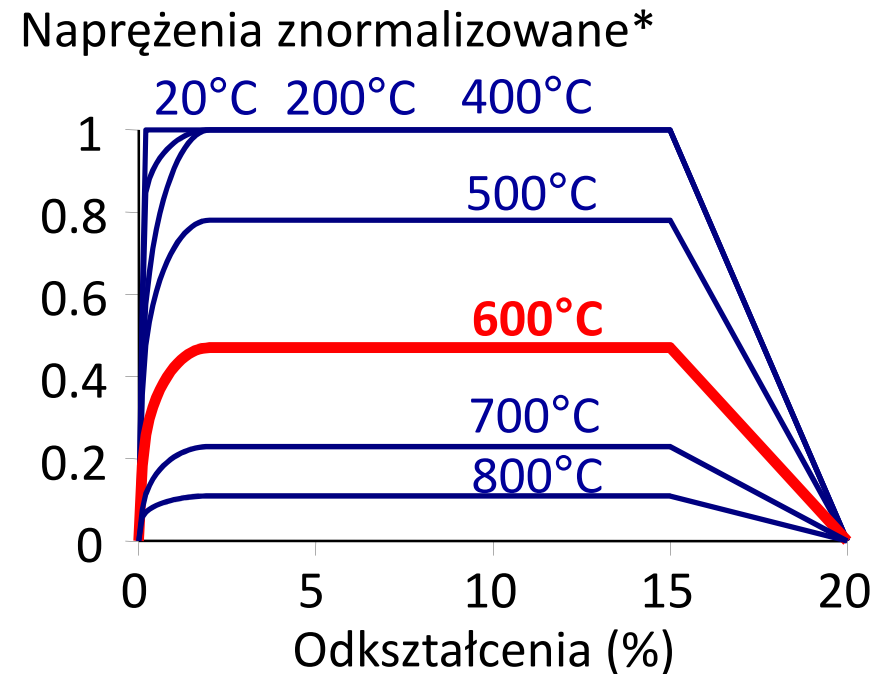
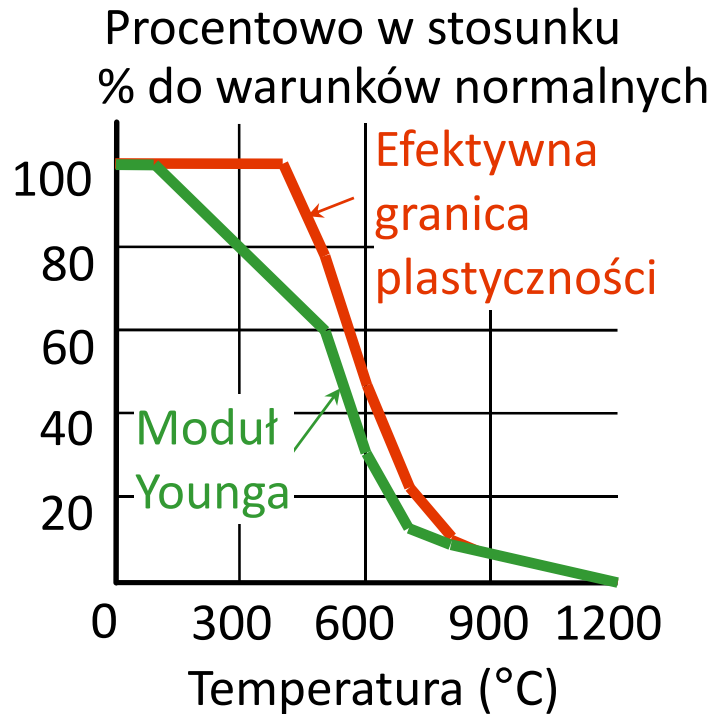
PN-EN 1993-1-2 § 3.4.1.1



WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁOWE – STALE WĘGLOWE

PN-EN 1993-1-2 § 3.2.1

➤ Właściwości mechaniczne w podwyższonych temperaturach



*Umocnienie stali wg Załącznika A.

Współczynniki redukcyjne:

- Dla efektywnej granicy plastyczności :
- Dla sprężystości podłużnej:

$$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$$

$$k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$$

OCENA ODPORNOŚCI OGNIOWEJ



Program
Uczenie się
przez całe życie

OCENA ODPORNOŚCI OGNIOWEJ – UWAGI OGÓLNE

- W celu wyznaczenia odporności ogniowej dopuszcza się stosowanie metod oceny konstrukcji, które wykorzystują:
 - ✓ Proste Modele Obliczeniowe (PMO)
 - Znajdują zastosowanie do pojedynczych elementów konstrukcyjnych w prostych stanach obciążenia (rozciąganie, ściskanie, zginanie)
 - Wykorzystują dwa alternatywne sposoby oceny: stosując kryterium wytrzymałościowe albo kryterium temperaturowe
 - Uwzględniają proces narastania temperatury w stali
 - Oparte na konserwatywnych założeniach upraszczających
 - ✓ Zaawansowane Modele Obliczeniowe (ZMO)
 - Znajdują zastosowanie do wszystkich typów konstrukcji
 - Pozwalają na określenie odpowiedzi mechanicznej i odpowiedzi termicznej konstrukcji
 - Bazują na zdobyczach Metody Elementów Skończonych i Metody Różnic Skończonych
 - Pozwalają na wiarygodne przybliżenie rzeczywistego zachowania się konstrukcji w pożarze.

OCENA ODPORNOŚCI OGNIOWEJ – UWAGI OGÓLNE

- Zakres zastosowań odpowiednich metod oceny konstrukcji

Oddziaływania termiczne	Pożar naturalny		Pożar nominalny	
	PMO	ZMO	PMO	ZMO
Analiza pojedynczego elementu	Tak (o ile dostępne)	Tak	Tak	Tak
Analiza podukładu konstrukcji	Nie znajdują zastosowania	Tak	Tak (o ile dostępne)	Tak
Globalna analiza konstrukcyjna	Nie znajdują zastosowania	Tak	Nie znajdują zastosowania	Tak

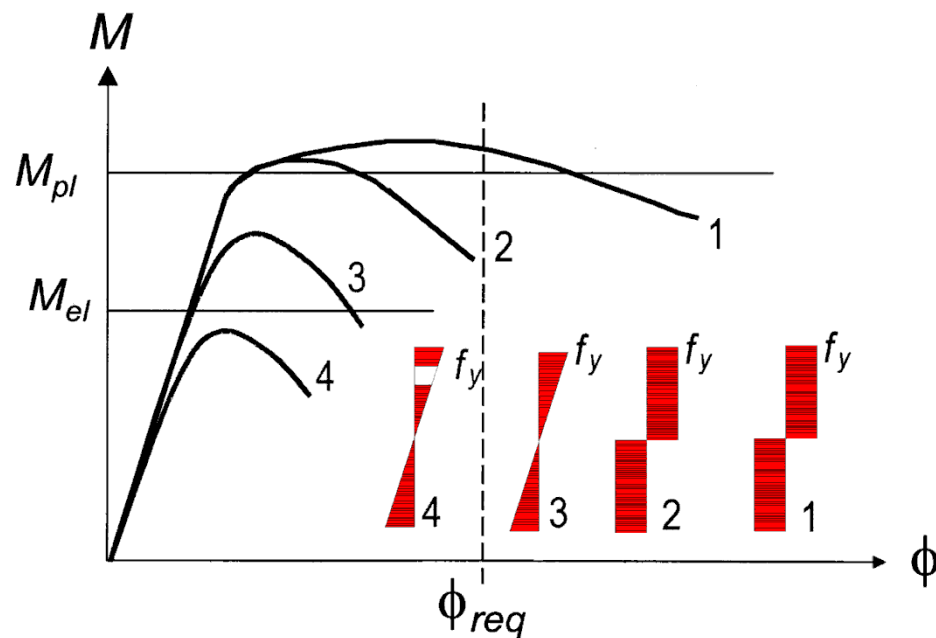
OCENA ODPORNOŚCI OGNIOWEJ – UWAGI OGÓLNE

➤ Klasyfikacja przekrojów

- ✓ Odbywa się na tych samych zasadach jak w obliczeniach przy normalnej temperaturze (PN-EN 1993-1-1) z uwzględnieniem zredukowanej wartości ε :

$$\varepsilon = 0,85 \left[235 / f_y \right]^{0.5}$$

PN-EN 1993-1-2 § 4.2.2



- | | | |
|---|---------------|---------------------|
| 1 | $M = M_{pl}$ | $\phi > \phi_{req}$ |
| 2 | $M = M_{pl}$ | $\phi < \phi_{req}$ |
| 3 | $M = M_{el}$ | |
| 4 | $M = M_{eff}$ | |

OCENA ODPORNOŚCI OGNIOWEJ – UWAGI OGÓLNE

- Zalecenia normowe dotyczące węzłów śrubowych i spawanych*

PN-EN 1993-1-2 § 4.2.1 (6)

- ✓ Sprawdzenie odporności ogniowej

$$\left(\frac{d_f}{\lambda_f}\right)_c \text{ węzła} \geq \text{minimalnej wartości } \left(\frac{d_f}{\lambda_f}\right)_m \text{ łączonych elementów, gdzie:}$$

d_f : grubość warstwy materiału izolacji ochronnej

λ_f : efektywna przewodność cieplna materiału izolacji ogniochronnej

- ✓ Sprawdzenie poziomu obciążenia

$\eta_{c,fi}$ węzła \leq maksymalnej wartości $\eta_{m,fi}$ któregośkolwiek z łączonych elementów , gdzie:

$\eta_{c,fi}$: stopień wytężenia węzła

$\eta_{m,fi}$: stopień wytężenia któregośkolwiek z łączonych elementów

* Alternatywnie odporność ogniową węzła można wyznaczyć z wykorzystaniem metody opisanej w Załączniku D.

PMO – KRYTERIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

➤ Obszar zastosowań:

- ✓ Elementy rozciągane, ściskane i zginane
- ✓ Przekroje zaklasyfikowane do klasy 1, 2 lub 3
- ✓ Elementy konstrukcji zabezpieczone i niezabezpieczone ogniowo
- ✓ A co z przekrojami klasy 4? Generalnie TAK, ale z pewnymi ograniczeniami i w sposób dostosowany do specyfiki tego typu przekrojów.

PMO – KRYTERIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

➤ Elementy rozciągane

PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.1

- ✓ O równomiernej temperaturze θ_a na wysokości przekroju

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \cdot N_{Rd} [\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi}] = A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}$$

- ✓ O nierównomiernej temperaturze θ_a na wysokości przekroju

Obliczeniową nośność elementu rozciąganego o nierównomiernym rozkładzie temperatury na wysokości przekroju można wyznaczyć ze wzoru:

$$N_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot k_{y,\theta,i} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}$$

A_i : elementarne pole przekroju z temperaturą θ_i

$k_{y,\theta,i}$: współczynnik redukcyjny granicy plastyczności stali w temperaturze θ_i

θ_i : temperatura w elementarnym polu A_i .

➤ Pręty ściskane obciążone osiowo

- ✓ O równomiernej temperaturze θ_a na wysokości przekroju

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}$$

gdzie χ_{fi} jest współczynnikiem wyboczenia giętnego w pożarowej sytuacji projektowej

PROSTE MODELE OBLICZENIOWE – KRYTERIA NOŚNOŚCI

PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.2

- ✓ Wartość współczynnika wyboczenia giętnego w pożarowej sytuacji projektowej określa się dla miarodajnego kierunku wyboczenia ze wzoru:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}}$$

przy
czym

$$\varphi = \frac{1}{2} [1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2]$$

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

gdzie

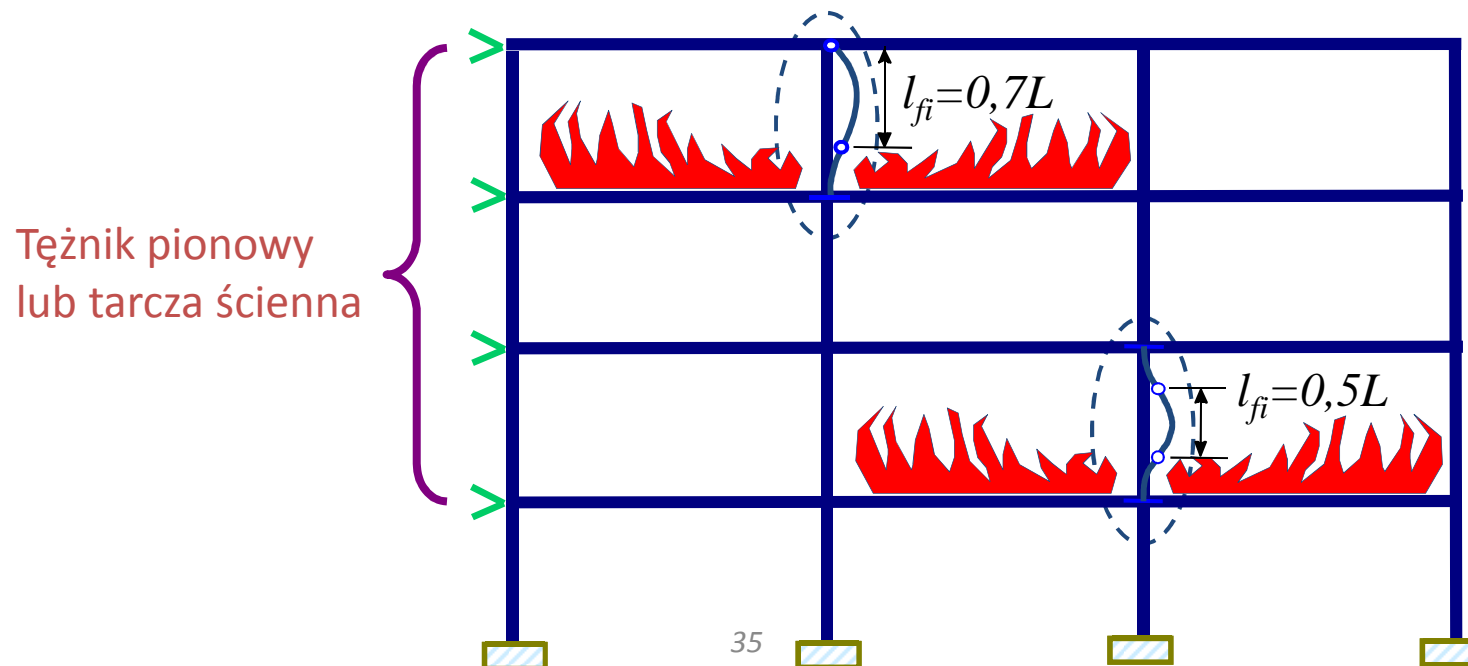
$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda}_{20^{\circ}\text{C}} \sqrt{k_{y,\theta} / k_{E,\theta}}$$

$$\bar{\lambda}_{20^{\circ}\text{C}} = \sqrt{A f_y / N_{cr}}$$

$$N_{cr} = \pi^2 (EI) / L_{fi}^2$$

PMO – KRYTERIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

- Długości wyboczeniowe słupów w ramach stężonych wyznacza się jak w obliczeniach w normalnej temperaturze, przy założeniu:
 - ✓ Ciągłości słupów i nieprzesuwności węzłów ograniczających element od góry i od dołu
 - ✓ Pod warunkiem, że odporność ogniowa elementów oddzielających pomieszczenia wydzielone ogniowo jest nie mniejsza niż odporność ogniowa słupa



PMO – KRYTERIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

- Belki o przekrojach klasy 1 lub 2, poprzecznie stężone
 - ✓ Przy równomiernym rozkładzie temperatury θ_a na wysokości przekroju

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \left[\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi} \right] M_{Rd} \quad \text{PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.3(1)}$$

M_{Rd} : nośność plastyczna przy zginaniu przekroju brutto w normalnej temperaturze, lub zredukowana nośność, wynikająca z równoczesnego działania znacznych sił ścinających, określana zgodnie z PN-EN 1993-1-1

- ✓ Przy nierównomiernym rozkładzie temperatury θ_a na wysokości przekroju

$$M_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot z_i \cdot k_{y,\theta,i} \cdot f_{y,i} / \gamma_{M,fi} \quad \text{PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.3 (3)}$$

z_i : odległość od osi obojętnej w stanie plastycznym do środka ciężkości elementarnego pola przekroju A_i ;

$f_{y,i}$: nominalna granica plastyczności f_y w elementarnym polu A_i przyjmowana jako dodatnia po ściskanej stronie przekroju w stanie plastycznym i jako ujemna po stronie rozciąganej

PMO – KRYTERIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

- Belki o przekrojach klasy 1 lub 2, poprzecznie stężone

Rozwiązanie uproszczone: $M_{fi,t,Rd} = M_{fi,\theta,Rd} / (\kappa_1 \cdot \kappa_2)$

- Wartości współczynników przystosowania κ_1 i κ_2

Rozkład temperatury w przekroju		κ_1
Belki nieosłonięte	Ekspozowane z 4 stron	1.00
	Ekspozowane z 3 stron	0.70
Belki osłonięte	Ekspozowane z 4 stron	1.00
	Ekspozowane z 3 stron	0.85
Rozkład temperatury na długości belki		κ_2
Belki ciągłe	Podpory belek	0.85
	Pozostałe przypadki	1.00

PMO – KRYTERIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

- Belki o przekrojach klasy 1 lub 2, poprzecznie niestężone

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} \cdot W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta,com} \cdot f_y / \gamma_{M,fi} \quad \text{PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.3(4)}$$

$\chi_{LT,fi}$: współczynnik zwiczenia w pożarowej sytuacji projektowej

$k_{y,\theta,com}$: współczynnik redukcyjny granicy plastyczności stali określony dla stali pasa ściskanego i najwyższej jego temperatury osiągniętej w czasie trwania pożaru

PMO – KRYTERIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

➤ Belki o przekrojach klasy 3, poprzecznie stężone:

- ✓ Przy równomiernym rozkładzie temperatury θ_a na wysokości przekroju

$$M_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} M_{Rd} [\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi}] \quad \text{PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.4(1)}$$

- ✓ Przy nierównomiernym rozkładzie temperatury θ_a na wysokości przekroju

$$M_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,max} M_{Rd} [\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi}] / \kappa_1 \kappa_2 \quad \text{PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.4(2)}$$

$$M_{Rd} = W_{el} \cdot f_y / \gamma_{M,0} \quad : \text{ Nośność sprężysta przekroju brutto w normalnej temperaturze}$$

➤ Belki o przekrojach klasy 3, poprzecznie niestężone:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} \cdot W_{el,y} \cdot k_{y,\theta,com} \cdot f_y / \gamma_{M,fi} \quad \text{PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.4(3)}$$

PMO – KRYTERIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

- Współczynnik zwiczenia w pożarowej sytuacji projektowej

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{\phi_{LT,\theta,com}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta,com}^2}} \quad \text{PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.3(5)}$$

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + \bar{\lambda}_{LT,\theta,com}^2 \right] \quad \alpha = 0,65 \sqrt{235 / f_y}$$

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{k_{y,\theta,com} / k_{E,\theta,com}}$$

gdzie

$$\left\{ \begin{array}{ll} \bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{W_{pl} f_y / M_{cr}} & \text{dla przekrojów klasy 1 i 2} \\ \bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{W_{el} f_y / M_{cr}} & \text{dla przekrojów klasy 3} \end{array} \right.$$

M_{cr} : Krytyczna wartość momentu zginającego przy zwiczeniu sprężystym

Zachowawczo, z korzyścią dla bezpieczeństwa można przyjąć, że $\theta_{a,com}$ odpowiada równomiernej temperaturze $\theta_{a,max}$.

PMO – KRYTERIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

➤ Sprawdzenie nośności na ścinanie:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,web} \cdot V_{Rd} \cdot \left[\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi} \right]$$

PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.3(6)
PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.4(4)

gdzie

V_{Rd} : nośność przekroju brutto przy ścinaniu w normalnej temperaturze, według PN-EN 1993-1-1

$k_{y,\theta,web}$: współczynnik redukcyjny granicy plastyczności stali w maksymalnej temperaturze, jaka wystąpi w ściance środkowej

PMO – KRYTERIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

- Elementy zginane i ściskane o przekrojach klasy 1 lub 2

PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.5

- ✓ Nośność elementu ze względu na stateczność ogólną $R_{fi,t,d}$ w czasie t trwania pożaru, bez zwichrzenia:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} + \frac{k_y \cdot M_{y,fi,Ed}}{W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} + \frac{k_z \cdot M_{z,fi,Ed}}{W_{pl,z} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 1$$

- ✓ Z uwzględnieniem zwichrzenia:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} \cdot W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} + \frac{k_z \cdot M_{z,fi,Ed}}{W_{pl,z} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 1$$

PMO – KRYTERIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

- Elementy zginane i ściskane o przekrojach klasy 3

PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.5

- ✓ Nośność elementu ze względu na stateczność ogólną $R_{fi,t,d}$ w czasie t trwania pożaru, bez zwichrzenia:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} + \frac{k_y \cdot M_{y,fi,Ed}}{W_{el,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} + \frac{k_z \cdot M_{z,fi,Ed}}{W_{el,z} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 1$$

- ✓ Z uwzględnieniem zwichrzenia

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} \cdot W_{el,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} + \frac{k_z \cdot M_{z,fi,Ed}}{W_{el,z} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 1$$

➤ Zasady projektowania elementów o przekrojach klasy 4

✓ Za wyjątkiem elementów rozciąganych,

$$\text{jeżeli } \theta_a \leq \theta_{cr} (=350^\circ\text{C}) \longrightarrow E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t}$$

✓ Pozostałe, bardziej szczegółowe informacje – w Załączniku E

PMO – KRYTERIUM TEMPERATUROWE

- Obszar zastosowań:
 - ✓ Pręty rozciągane
 - ✓ Elementy o przekrojach klasy 1, 2 lub 3
 - ✓ Belki i krępe elementy ściskane
 - ✓ Elementy konstrukcyjne ze stali węglowej

PMO – KRYTERIUM TEMPERATUROWE

- Wartość temperatury krytycznej θ_{cr} w czasie t trwania pożaru dla elementu o równomiernym rozkładzie temperatury

$$\theta_{cr} = 39.19 \ln \left[\frac{1}{0.9674 \mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482$$

μ_0 : wskaźnik wykorzystania

Typ elementu konstrukcyjnego	μ_0
Elementy rozciągane i ściskane bez ryzyka utraty stateczności	$\mu_0 = \frac{E_{fi,d,t}}{R_{fi,d,0}} = \eta_{fi,t} \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M0}}$
Elementy zginane	$\mu_0 = \frac{E_{fi,d,t}}{R_{fi,d,0}} = \eta_{fi,t} \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M0}} \kappa_1 \kappa_2$

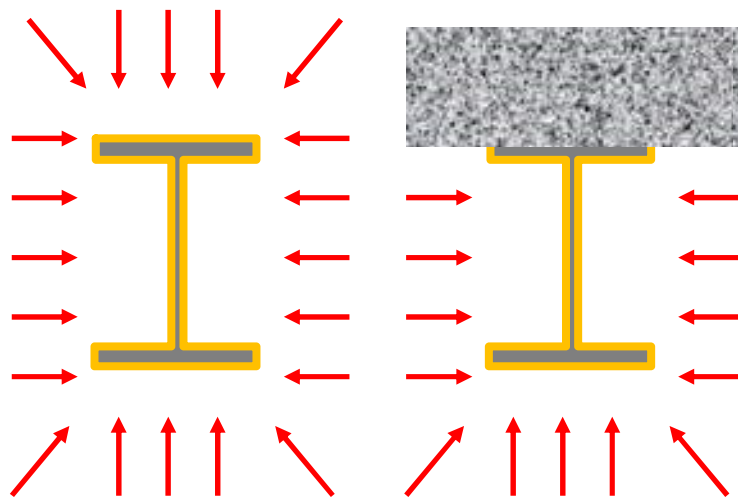
PMO – NARASTANIE TEMPERATURY W STALI

- Elementy konstrukcyjne wewnętrzne
 - ✓ Bez izolacji ogniochronnej
 - ✓ Z izolacją ogniochronną
- Elementy konstrukcyjne zewnętrzne

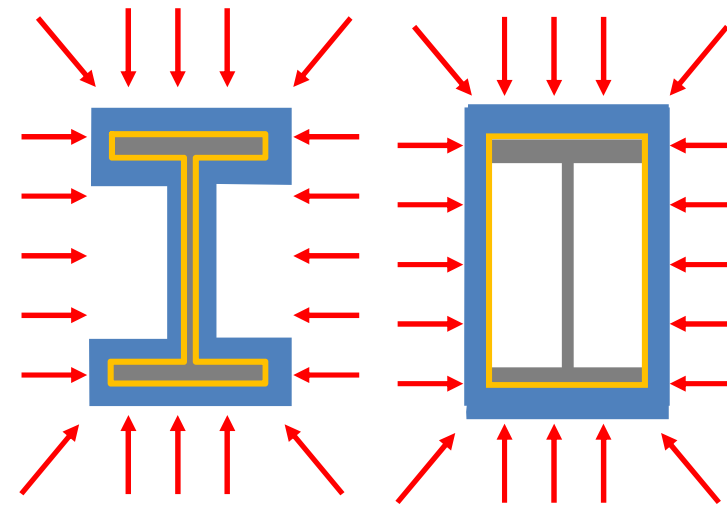


PMO – NARASTANIE TEMPERATURY W STALI

- Wskaźnik przekroju (wskaźnik ekspozycji): stosunek poła powierzchni nagrzewanej (wyeksponowanej na działanie temperatury) do objętości nagrzewanego elementu stalowego.



Elementy konstrukcyjne wewnętrzne bez izolacji ogniochronnej

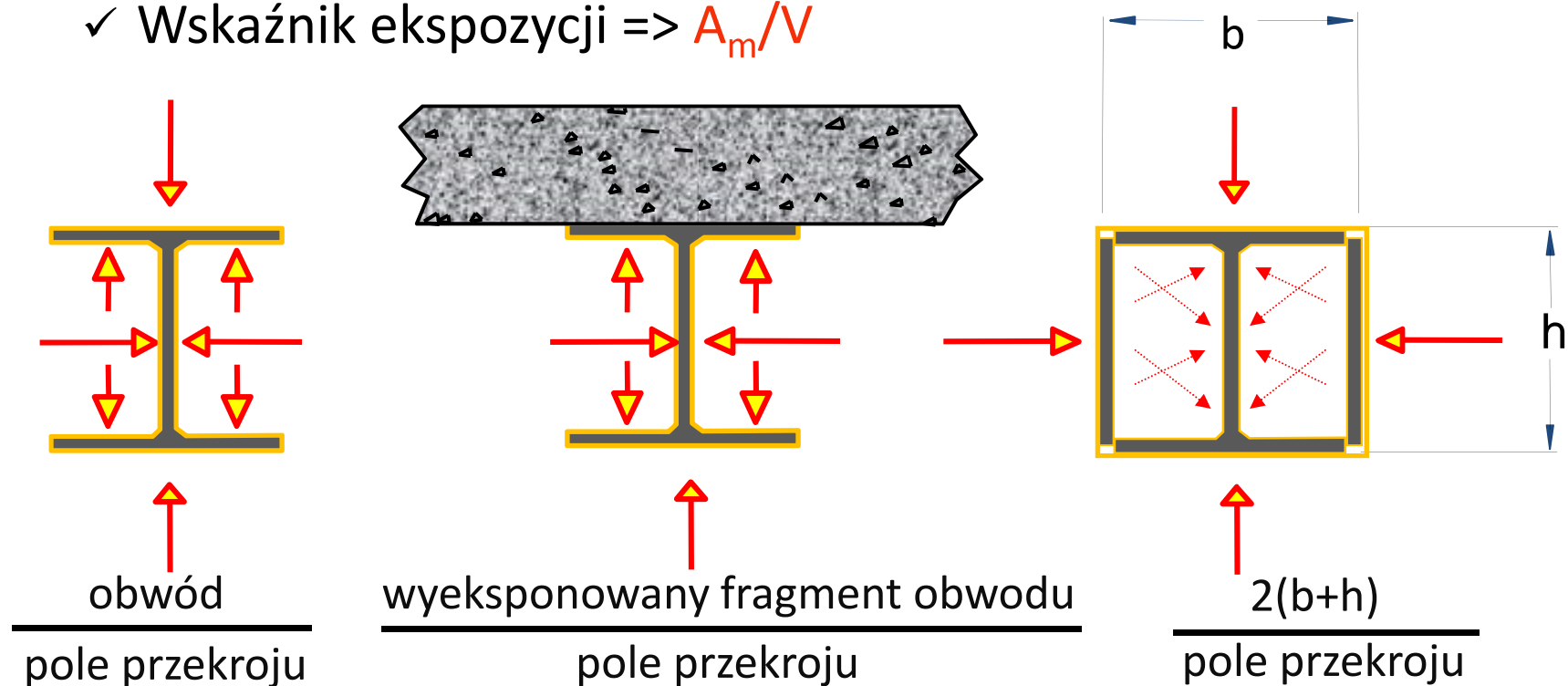


Elementy konstrukcyjne wewnętrzne izolowane termicznie

PMO – NARASTANIE TEMPERATURY W STALI

- Niezabezpieczone wewnętrzne elementy konstrukcyjne

✓ Wskaźnik ekspozycji => A_m/V



PMO – NARASTANIE TEMPERATURY W STALI

- Przyrost temperatury w stalowym, nieosłoniętym elemencie prętowym:

PN-EN 1993-1-2 § 4.2.5.1

$$\Delta \theta_{a.t} = \frac{k_{sh}}{c_a \rho_a} \frac{A_m}{V} \dot{h}_{net} \Delta t$$

$\Delta t < 5$ sekund

gdzie:

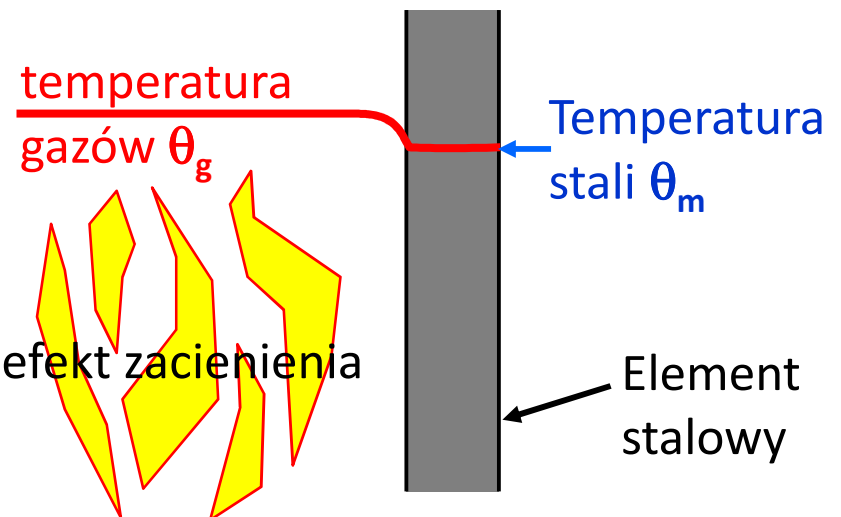
k_{sh} : współczynnik poprawkowy uwzględniający efekt zacielenia

A_m/V : wskaźnik ekspozycji przekroju [1/m]

c_a : ciepło właściwe stali [J/kg·K]

\dot{h}_{net} : wartość obliczeniowa przejętego strumienia ciepła na jednostkę powierzchni [W/m²]

ρ_a : gęstość masy stali [kg/m³].



PMO – NARASTANIE TEMPERATURY W STALI

- Współczynnik poprawkowy uwzględniający efekt zacienienia k_{sh}
Efekt zacienienia jest spowodowany lokalnym zmniejszeniem radiacyjnego przepływu ciepła z uwagi na przesłanianie wynikające z kształtu przekroju:

- ✓ Dla profili otwartych (I lub H) => należy uwzględnić efekt zacienienia

$$k_{sh} = 0,9 \left(\frac{A_m}{V} \right)_b / \frac{A_m}{V}$$

PN-EN 1993-1-2 § 4.2.5.1(2)

- ✓ We wszystkich pozostałych przypadkach, t.j. dla przekrojów o wypukłym kształcie => efekt zacienienia nie odgrywa roli*

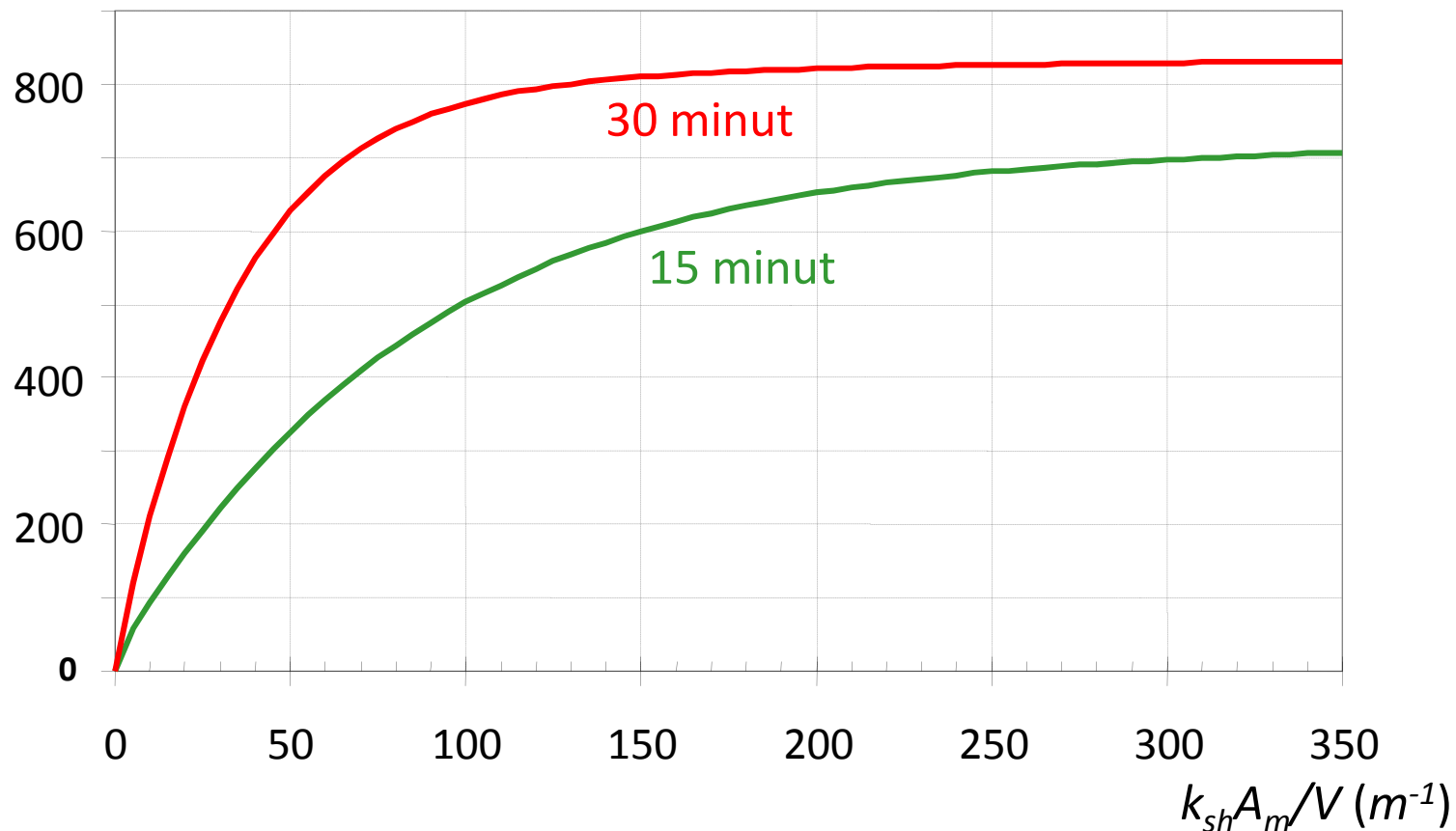
$$k_{sh} = 1.0$$

- *Pominięcie efektu zacienienia ($k_{sh}=1.0$) prowadzi do uzyskania wyników po stronie bezpiecznej.

PMO – NARASTANIE TEMPERATURY W STALI

- Przykładowa temperatura niezabezpieczonego elementu stalowego w funkcji wskaźnika ekspozycji przekroju:

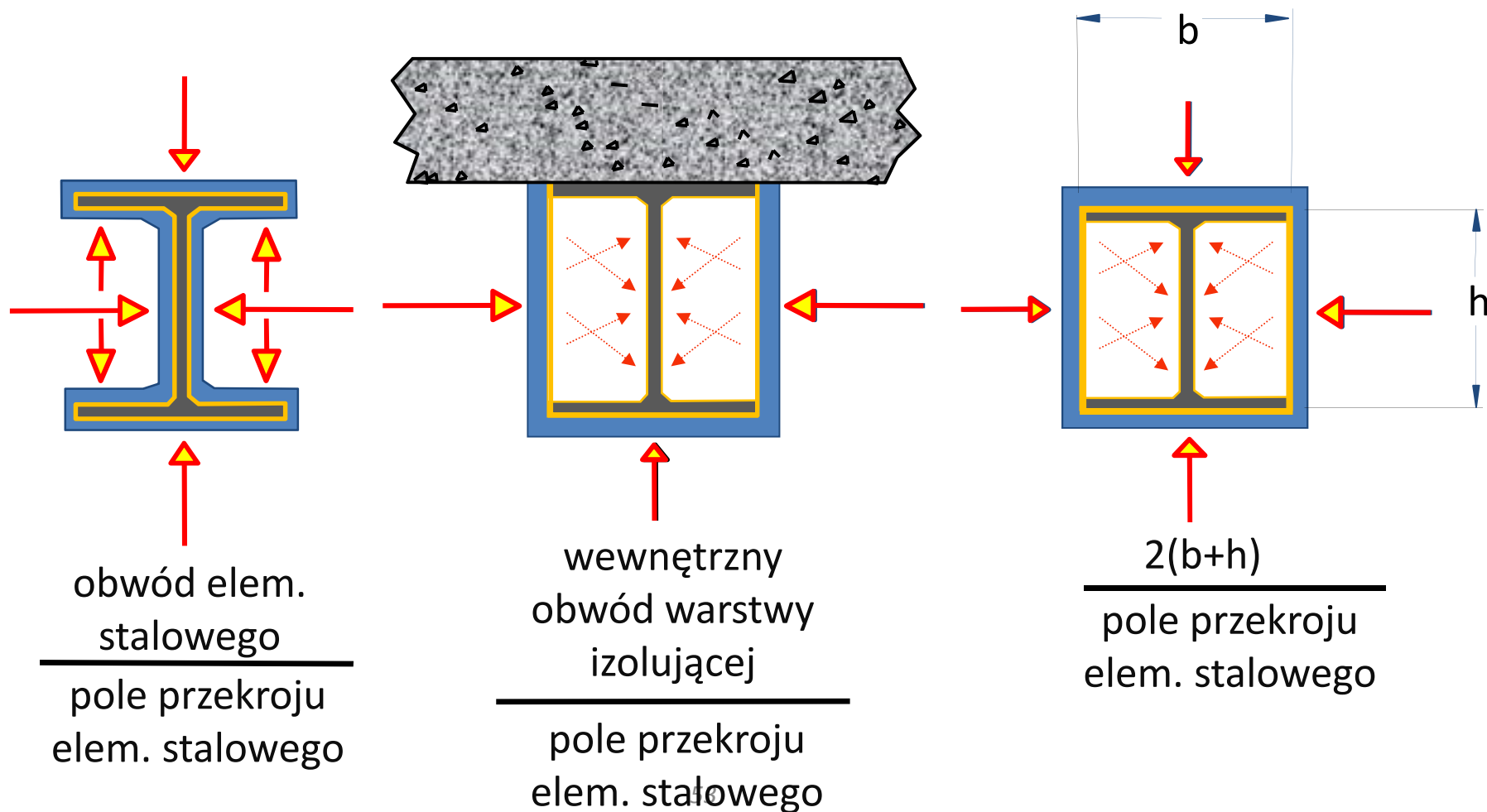
Temperatura [°C]



PMO – NARASTANIE TEMPERATURY W STALI

➤ Izolowane wewnętrzne elementy konstrukcyjne

✓ Wskaźnik ekspozycji => A_p/V

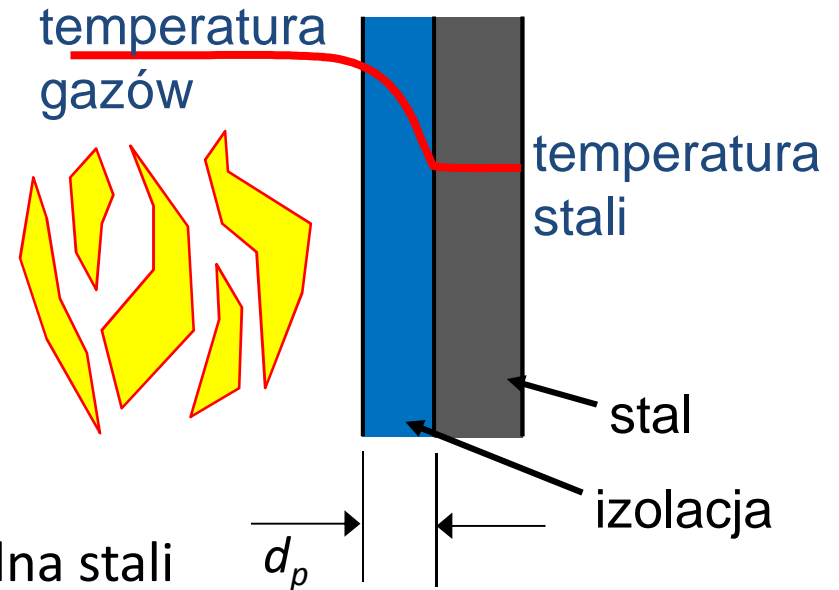


PMO – NARASTANIE TEMPERATURY W STALI

- Warstwy izolacyjne mogą występować w formie konturowej lub skrzynkowej
- Ciepło zakumulowane w warstwie izolacyjnej:

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

$c_p \rho_p$: pojemność cieplna stali
 $c_a \rho_a$: pojemność cieplna izolacji



- Przyrost temperatury osłoniętego elementu stalowego w przedziale czasu Δt :

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

PN-EN 1993-1-2 § 4.2.5.2

$$\Delta t \leq 30 \text{ sekund}$$

PMO – NARASTANIE TEMPERATURY W STALI

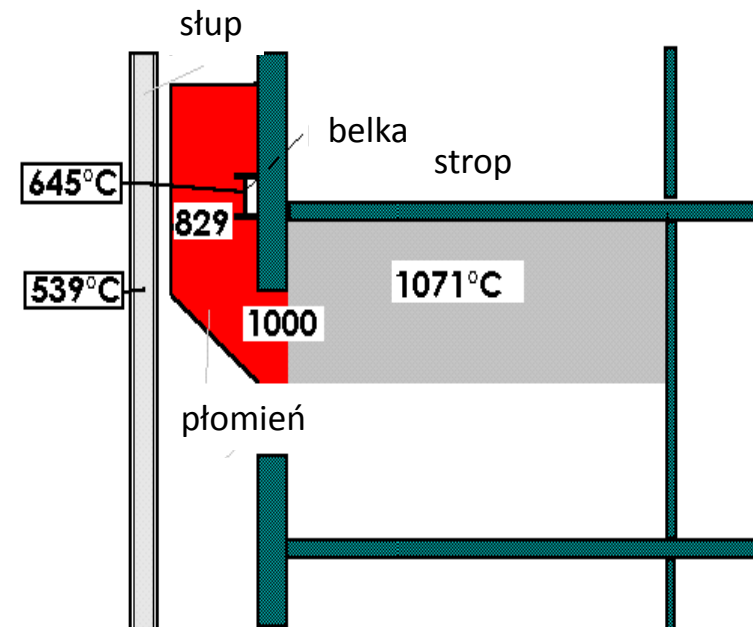
Reguły projektowania dla zewnętrznych stalowych elementów konstrukcyjnych (obowiązują jedynie dla stali węglowych)

➤ Temperaturę zewnętrznych elementów stalowych wyznacza się biorąc pod uwagę:

- ✓ Radiacyjny i konwekcyjny strumień ciepła od płomieni wydostających się przez otwory
- ✓ Radiacyjny strumień ciepła z pomieszczenia wydzielonego ogniowo
- ✓ Radiacyjne i konwekcyjne straty ciepła z elementu stalowego do otaczającej atmosfery
- ✓ Rozmiary i usytuowanie elementów konstrukcyjnych
- ✓ Geometrię pomieszczeń

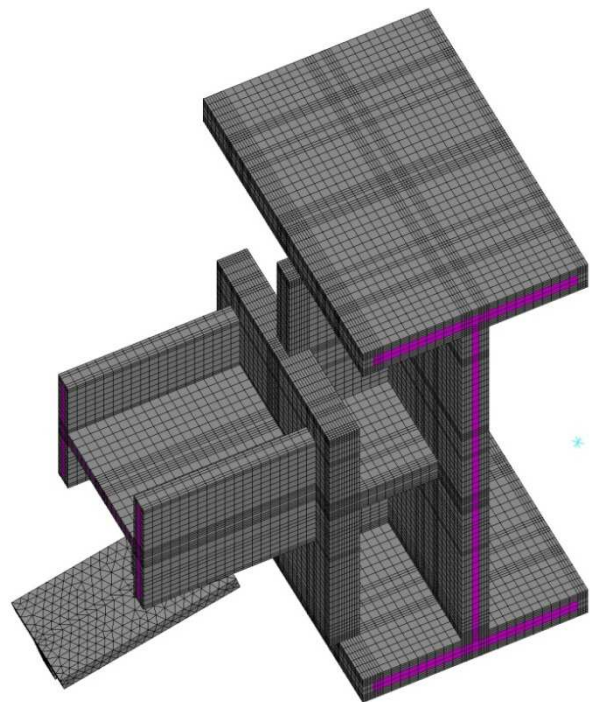
■ Oddziaływania termiczne: wg Załącznika B, EC1

■ Nagrzewanie stali: wg Załącznika B, EC3

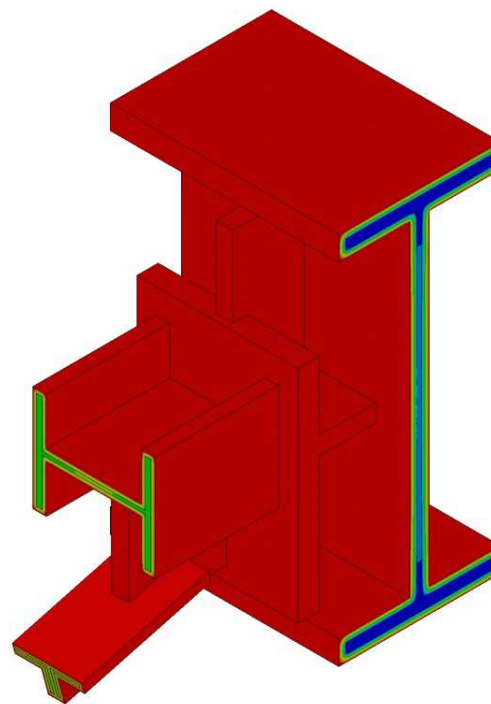


ZAAWANSOWANE MODELE OBLICZENIOWE

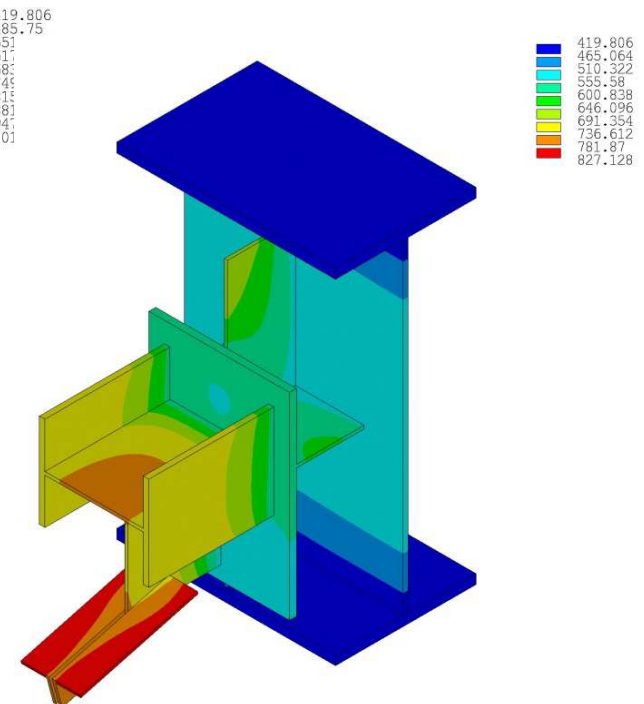
- Przykład zastosowania zaawansowanych analiz termicznych
 - Symulacja nagrzewanie węzła konstrukcji stalowej, dla którego stawia się wymaganie nośności na poziomie R90



Model numeryczny węzła izolowanego ogniowo



Rozkład pola temperatur węzła izolowanego



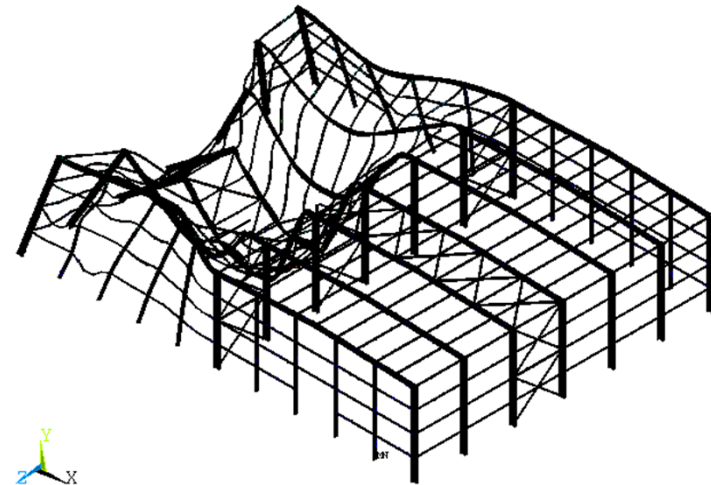
Rozkład pola temperatur w elementach składowych węzła

ZAAWANSOWANE MODELE OBLICZENIOWE

- Przykład zastosowania zaawansowanych analiz wytrzymałościowych
 - Schemat zniszczenia stalowej konstrukcji prętowej wystawionej na działanie ognia



Ściana
oddzielenia
pożarowego



PRZYKŁADY OBLICZENIOWE



Program
Uczenie się
przez całe życie

PRZYKŁADY OBLICZENIOWE - PRZEGLĄD

Przykłady obliczeniowe z wykorzystaniem procedur zawartych w PN-EN 1993, część 1-2 :

- Słup stalowy obciążony osiowo
- Element ściskany mimośrodowo (ściskany i zginany)
- Belka o przekroju zamkniętym

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY – SŁUP OSIOWO ŚCISKANY

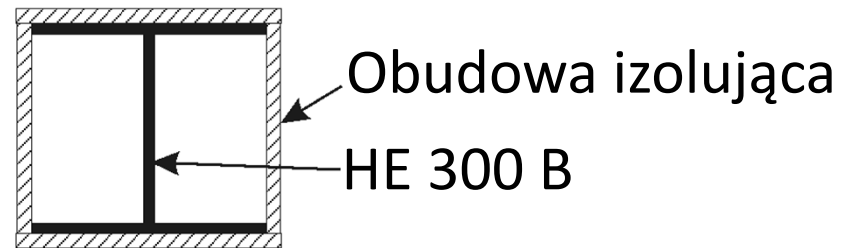
Cel: Sprawdzenie nośności (odporności) ogniowej słupa przy osiowym ściskaniu w warunkach pożaru

- ✓ Przyjęto prosty model obliczeniowy elementu ściskanego



PRZYKŁAD OBLICZENIOWY – SŁUP OSIOWO ŚCISKANY

- ✓ Kategoria obiektu: dom towarowy
- ✓ Wymagana klasa odporności ppoż.: R 90
- ✓ Obciążenia:
 - $G_k = 1200 \text{ kN}$
 - $P_k = 600 \text{ kN}$
- ✓ Przekrój słupa:
 - Profil walcowany
 - HE 300 B
- ✓ Obudowa izolująca: zabudowa konturowa z płyty gipsowej o grubości $d_p = 3 \text{ cm}$
- ✓ Klasa stali: S 235
- ✓ Przyjęto równomierne nagrzanie profilu słupa do temperatury $\theta_a = 445 \text{ °C}$



PRZYKŁAD OBLICZENIOWY – SŁUP OSIOWO ŚCISKANY

➤ Oddziaływania

✓ Oddziaływania mechaniczne podczas pożaru

- Kombinacja oddziaływań dla wyjątkowej sytuacji obliczeniowej: PN-EN 1991-1-2 § 4.3

$$E_{fi,d} = G + \psi_1 Q_1 + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_i$$

$$E_{fi,d} = G + 0.6Q \quad \psi_2 \text{ Współczynnik kombinacyjny dla powierzchni handlowych} = 0.6$$

$$\Rightarrow N_{fi,d} = 1200 \text{ kN} + 0.6 \cdot 600 \text{ kN} = 1560 \text{ kN}$$

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY – SŁUP OSIOWO ŚCISKANY

- Współczynniki redukcyjne $k_{y,\theta}$ i $k_{E,\theta}$

PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.2

$$\theta_a = 445 \text{ °C} \Rightarrow k_{y,\theta} = 0.901$$
$$k_{E,\theta} = 0.655$$

- Współczynnik wyboczeniowy (wyboczenia giętnego) χ_{fi}

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{k_{y,\theta} / k_{E,\theta}} = 0.21 \cdot \sqrt{0.901 / 0.655} = 0.25$$

gdzie: $\bar{\lambda} = L_{Kz} / (i_z \cdot \lambda_a) = 0.5 \cdot 300 / 7.58 \cdot 93.9 = 0.21$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = \frac{1}{0.61 + \sqrt{0.61^2 - 0.25^2}} = 0.86$$

gdzie: $\varphi = 0.5 \cdot [1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2] = 0.5 [1 + 0.65 \cdot 0.25 + 0.25^2] = 0.61$

oraz $\alpha = 0.65 \cdot \sqrt{235 / f_y} = 0.65 \cdot \sqrt{235 / 235} = 0.65$

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY – SŁUP OSIOWO ŚCISKANY

- Obliczeniowa nośność na wyboczenie giętne: [PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.2](#)

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} \cdot A \cdot k_{y,\vartheta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi} = 0.86 \cdot 149 \cdot 0.901 \cdot \frac{23.5}{1.0} = 2713 \text{ kN}$$

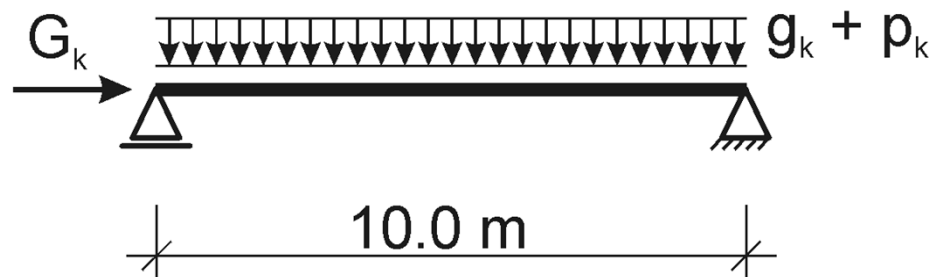
- Sprawdzenie nośności według kryterium wytrzymałościowego:

$$N_{fi,d} / N_{b,fi,t,Rd} = 1560 / 2713 = 0.58 < 1$$

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY – BELKA ŚCISKANA I ZGINANA

Cel: Sprawdzenie nośności (odporności) ogniowej belki ściskanej mimośrodowo w warunkach pożaru

- ✓ Przyjęto prosty model obliczeniowy elementu ściskanego i zginanego równocześnie (ściskanego mimośrodowo), o schemacie statycznym jak na rysunku poniżej



PRZYKŁAD OBLICZENIOWY – BELKA ŚCISKANA I ZGINANA

✓ Kategoria obiektu: powierzchnie biurowe

✓ Wymagana klasa odporności ppoż.: R 90

✓ Obciążenia:

- $G_k = 96.3 \text{ kN}$

- $g_k = 1.5 \text{ kN/m}$

- $p_k = 1.5 \text{ kN/m}$

✓ Przekrój belki:

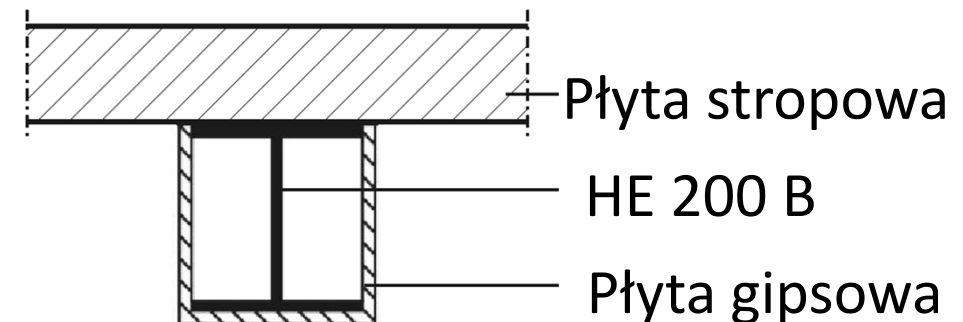
- Profil walcowany

- HE 200 B

✓ Obudowa izolująca: zabudowa konturowa z płyty gipsowej o grubości $d_p = 2 \text{ cm}$

✓ Klasa stali: S 235

✓ Przyjęto równomierne nagrzanie profilu belki do temperatury $\theta_a = 540 \text{ }^\circ\text{C}$



PRZYKŁAD OBLICZENIOWY – BELKA ŚCISKANA I ZGINANA

➤ Oddziaływania

✓ Oddziaływania mechaniczne podczas pożaru

- Kombinacja oddziaływań dla wyjątkowej sytuacji obliczeniowej:

PN-EN 1991-1-2 § 4.3

$$E_{fi,d} = G + \psi_1 Q_1 + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_i$$

$$E_{fi,d} = G + 0.3 \cdot Q \quad \psi_2 \text{ Współczynnik kombinacyjny dla powierzchni biurowych} = 0.3$$

$$N_{fi,d} = 96.3 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow M_{fi,d} = [1.5 + 0.3 \cdot 1.5] \cdot \frac{10^2}{8} = 24.38 \text{ kNm}$$

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY – BELKA ŚCISKANA I ZGINANA

- Współczynniki redukcyjne $k_{y,\theta}$ i $k_{E,\theta}$:

$$\theta_a = 540 \text{ °C} \Rightarrow k_{y,\theta} = 0.656$$
$$k_{E,\theta} = 0.484$$

- Sprawdzenie nośności belki na wyboczenie giętne :

- ✓ Wartości współczynników wyboczenia giętnego $\chi_{min,fi}$

$$\bar{\lambda}_y = L_{cr} / (i_y \cdot \lambda_a) = 1000 / (8.54 \cdot 93.9) = 1.25 \quad \text{PN-EN 1993-1-1 § 6.3.1.3}$$

$$\bar{\lambda}_z = L_{cr} / (i_z \cdot \lambda_a) = 1000 / (5.07 \cdot 93.9) = 2.10$$

$$\bar{\lambda}_{y,\theta} = \bar{\lambda}_y \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 1.25 \sqrt{\frac{0.656}{0.484}} = 1.46 \quad \text{PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.5}$$

$$\bar{\lambda}_{z,\theta} = \bar{\lambda}_z \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 2.1 \sqrt{\frac{0.656}{0.484}} = 2.44$$

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY – BELKA ŚCISKANA I ZGINANA

PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.5

✓ Wartości współczynników wyboczeniowych $\chi_{min,fi}$ (cd.):

$$\varphi_{y,\theta} = 0.5 \cdot [1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{y,\theta} + \bar{\lambda}_{y,\theta}^2] = 0.5 [1 + 0.65 \cdot 1.46 + 1.46^2] = 2.04$$

$$\varphi_{z,\theta} = 0.5 \cdot [1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{z,\theta} + \bar{\lambda}_{z,\theta}^2] = 0.5 [1 + 0.65 \cdot 2.44 + 2.44^2] = 4.27$$

gdzie: $\alpha = 0.65 \cdot \sqrt{235 / f_y} = 0.65 \cdot \sqrt{235 / 235} = 0.65$

$$\chi_{y,fi} = \frac{1}{\varphi_{y,\theta} + \sqrt{\varphi_{y,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{y,\theta}^2}} = \frac{1}{2.04 + \sqrt{2.04^2 - 1.46^2}} = 0.29$$

$$\chi_{z,fi} = \frac{1}{\varphi_{z,\theta} + \sqrt{\varphi_{z,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{z,\theta}^2}} = \frac{1}{4.27 + \sqrt{4.27^2 - 2.44^2}} = 0.13$$

$$\Rightarrow \chi_{min,fi} = \chi_{z,fi} = 0.13$$

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY – BELKA ŚCISKANA I ZGINANA

PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.5

➤ Warunek interakcyjny dla prętów ściskanych i zginanych :

✓ Sprawdzenie:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} + \frac{k_y \cdot M_{y,fi,Ed}}{W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 1$$

$$\frac{96.3}{0.13 \cdot 78.1 \cdot 0.656 \cdot 23.5 / 1.0} + \frac{1.50 \cdot 2438}{642.5 \cdot 0.656 \cdot 23.5 / 1.0} = 0.98 \leq 1$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \mu_y &= (1.2 \cdot \beta_{M,y} - 3) \cdot \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0.44 \cdot \beta_{M,y} - 0.29 = \\ &= (1.2 \cdot 1.3 - 3) \cdot 1.46 + 0.44 \cdot 1.3 - 0.29 = -1.82 \end{aligned}$$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y \cdot N_{fi,d}}{\chi_{y,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{m,fi}} = 1 - \frac{-1.82 \cdot 96.3}{0.29 \cdot 78.1 \cdot 0.656 \cdot 23.5 / 1.0} = 1.50$$

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY – BELKA ŚCISKANA I ZGINANA

➤ Sprawdzenie nośności belki na zwichrzenie:

✓ Smukłość względna w temperaturze otoczenia $\bar{\lambda}_{LT}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{642.5 \cdot 23.5}{14547.5}} = 1.02 \quad \text{PN-EN 1993-1-1 § 6.3.1.3}$$

$$\begin{aligned} \text{gdzie: } M_{cr} &= C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right] = \\ &= 1.132 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 2000}{(1.0 \cdot 1000)^2} \cdot \\ &\cdot \left[\sqrt{\left(\frac{1.0}{1.0}\right)^2 \frac{171100}{2003} + \frac{(1.0 \cdot 1000)^2 \cdot 8100 \cdot 59.3}{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 2003} + \left(0.459 \cdot \frac{20}{2}\right)^2} - 0.459 \cdot \frac{20}{2} \right] = \\ &= 14547.5 \text{ kNcm} \end{aligned}$$

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY – BELKA ŚCISKANA I ZGINANA

➤ Sprawdzenie nośności belki na zwichrzenie (ciąg dalszy):

✓ Smukłość względna w sytuacji pożarowej $\bar{\lambda}_{LT,\theta}$

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 1.02 \cdot \sqrt{\frac{0.656}{0.484}} = 1.19 \quad \text{PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.3}$$

✓ Obliczenie wartości współczynnika zwichrzenia $\chi_{LT,fi}$

PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.3

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\varphi_{LT,\theta} + \sqrt{\varphi_{LT,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2}} = \frac{1}{1.59 + \sqrt{1.59^2 - 1.19^2}} = 0.38$$

gdzie:

$$\varphi_{LT,\theta} = 0.5 \cdot [1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{LT,\theta} + \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2] = 0.5 [1 + 0.65 \cdot 1.19 + 1.19^2] = 1.59$$

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY – BELKA ŚCISKANA I ZGINANA

- Sprawdzenie nośności belki na zwichrzenie (ciąg dalszy):
 - ✓ Sprawdzenie warunku interakcyjnego

$$\frac{N_{fi,d}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,fi,d}}{\chi_{LT,fi} \cdot W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 1 \quad \text{PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.5}$$

$$\frac{96.3}{0.13 \cdot 78.1 \cdot 0.656 \cdot 23.5 / 1.0} + \frac{0.80 \cdot 2438}{0.38 \cdot 642.5 \cdot 0.656 \cdot 23.5 / 1.0} = 0.62 + 0.52 = 1.14 > 1$$

Interakcyjny warunek nośności z uwzględnieniem zwichrzenia nie jest spełniony – belka wymaga przeprojektowania

gdzie:

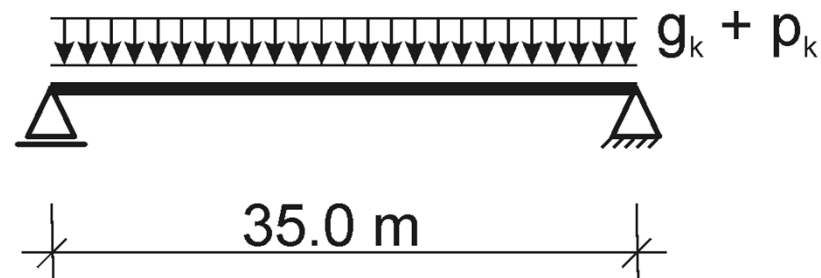
$$\mu_{LT} = 0.15 \cdot \bar{\lambda}_{z,\theta} \cdot \beta_{M,LT} - 0.15 = 0.15 \cdot 2.44 \cdot 1.3 - 0.15 = 0.33 < 0.9$$

$$k_{LT} = \frac{\mu_{LT} \cdot N_{fi,d}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{m,fi}} = \frac{0.33 \cdot 96.3}{0.13 \cdot 78.1 \cdot 0.656 \cdot 23.5 / 1.0} = 0.80$$

PRZYKŁAD – BELKA O PRZEKROJU ZAMKNIĘTYM

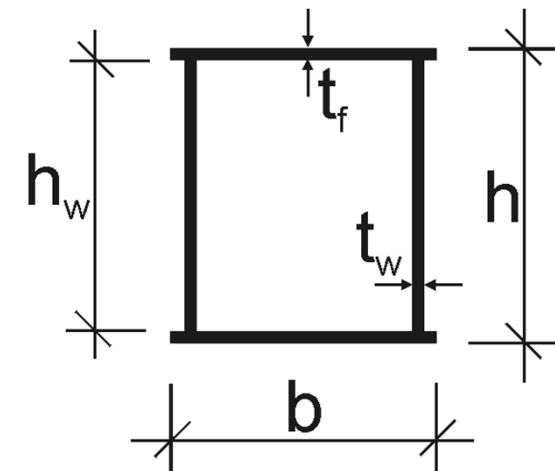
Cel: Sprawdzenie nośności (odporności) ogniowej belki o przekroju zamkniętym w warunkach pożaru

- ✓ Przyjęto prosty model obliczeniowy elementu zginanego obciążonego w sposób równomierny na długości o schemacie statycznym, jak na rysunku poniżej
- ✓ Ponadto założono, że analizowana belka jest zabezpieczona przed utratą stateczności globalnej



PRZYKŁAD – BELKA O PRZEKROJU ZAMKNIĘTYM

- Kategoria obiektu: Analizowany element jest częścią konstrukcji dachu hali
- Wymagania w zakresie klasy odporności ppoż.: R 30
- Obciążenia:
 - ✓ $g_k = 9.32 \text{ kN/m}$
 - ✓ $p_k = 11.25 \text{ kN/m}$
- Przekrój belki:
 - ✓ Profil skrzynkowy spawany
 - ✓ $h_w = 650 \text{ mm}$, $t_w = 25 \text{ mm}$, $h = 700 \text{ mm}$, $b = 450 \text{ mm}$
- Rodzaj zabezpieczenia ogniowego: żadne
- Rodzaj obciążenia zmiennego: obciążenie śniegiem
- Klasa stali: S 355



PRZYKŁAD – BELKA O PRZEKROJU ZAMKNIĘTYM

➤ Oddziaływania

✓ Oddziaływania mechaniczne podczas pożaru

- Kombinacja oddziaływań dla wyjątkowej sytuacji obliczeniowej:

PN-EN 1991-1-2 § 4.3

$$E_{fi,d} = G + \psi_1 Q_1 + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_i$$

ψ_2 Współczynnik kombinacyjny dla obciążenia śniegiem w sytuacji pożarowej = 0.0

$$\Rightarrow M_{fi,d} = [9.32 + 0.0 \cdot 11.25] \cdot \frac{35.0^2}{8} = 1427.1 \text{ kNm}$$

PRZYKŁAD – BELKA O PRZEKROJU ZAMKNIĘTYM

- ✓ Maksymalna temperatura elementu stalowego w pożarze
 - Temperatura gazów na podstawie krzywej standardowej temperatura-czas:

$$\theta_g = 20 + 354 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad \text{PN-EN 1991-1-2 § 3.2.1}$$

- Przyrost temperatury przekroju stalowego: PN-EN 1993-1-2 § 4.2.5.1

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{a,t} &= k_{sh} \cdot \frac{A_m / V}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \dot{h}_{net} \cdot \Delta t = 1.0 \cdot \frac{40}{600 \cdot 7850} \cdot 5 \cdot \dot{h}_{net} = \\ &= 4.25 \cdot 10^{-5} \cdot \dot{h}_{net} \end{aligned}$$

Gdzie: wskaźnik ekspozycji przekroju elementu stalowego bez izolacji ogniochronnej:

$$\frac{A_m}{V} \approx \frac{1}{t} = 40 \text{ m}^{-1}$$

i – dla uproszczenia:

$$c_a = 600 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$\Delta t = 5 \text{ sekund}$$

$$k_{sh} = 1.0$$

//

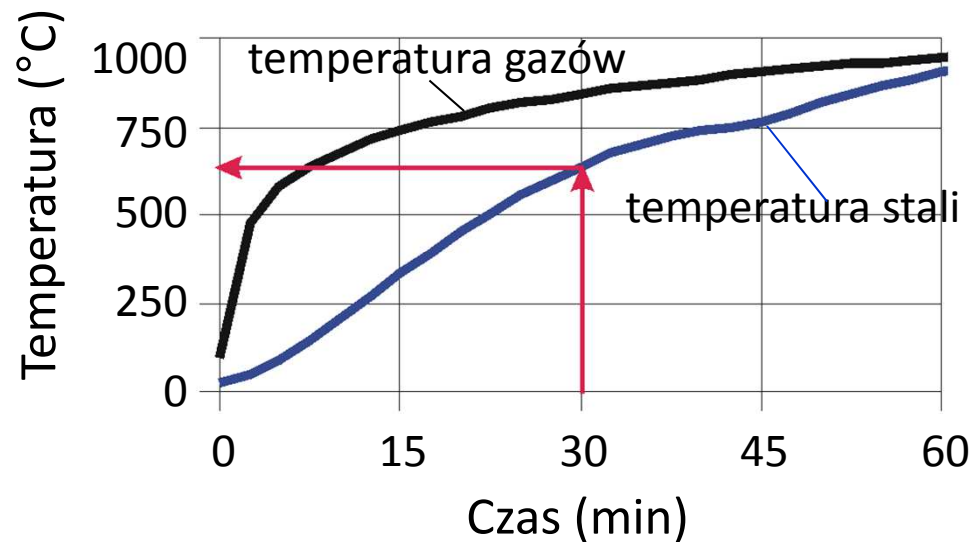
PRZYKŁAD – BELKA O PRZEKROJU ZAMKNIĘTYM

- ✓ Przyrost temperatury przekroju stalowego (ciąg dalszy)

PN-EN 1991-1-2 § 3.1

$$\begin{aligned} \dot{h}_{net} &= \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) + \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_r \cdot \sigma \cdot \left((\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right) = \\ &= 25 \cdot (\theta_g - \theta_m) + 3.969 \cdot 10^{-8} \cdot \left((\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right) \end{aligned}$$

$$\theta_{a,max,30} = 646^\circ\text{C}$$



PRZYKŁAD – BELKA O PRZEKROJU ZAMKNIĘTYM

PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.3

- Weryfikacja według kryterium temperaturowego:

$$M_{fi,Rd,0} = W_{pl} \cdot f_y \cdot k_{y,\theta,max} / \gamma_{M,fi} = 12875 \cdot 10^3 \cdot 355 \cdot \frac{1.0}{1.0} \cdot 10^{-6} =$$
$$= 4570.6 \text{ kNm}$$

gdzie:

$$k_{y,\theta,max} = 1.0$$

$$\gamma_{M,fi} = 1.0$$

$$W_{pl} = 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot A_w}{2} \cdot \frac{h_w}{4} + A_f \cdot \frac{h - t_w}{2} \right) = 2 \left(16250 \cdot \frac{650}{4} + 11250 \cdot \frac{700 - 25}{2} \right) =$$
$$= 12875 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

PRZYKŁAD – BELKA O PRZEKROJU ZAMKNIĘTYM

- Weryfikacja według kryterium temperaturowego (ciąg dalszy):

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0} = M_{fi,d} / M_{fi,Rd,0} = 1427.1 / 4570.6 = 0.31$$

$$\Rightarrow \theta_{a,cr} = 659^\circ\text{C}$$

PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.3

$$\frac{\theta_{a,max,30}}{\theta_{a,cr}} = \frac{646}{659} = 0.98 < 1$$

PRZYKŁAD – BELKA O PRZEKROJU ZAMKNIĘTYM

PN-EN 1993-1-2 § 4.2.3.3

- Weryfikacja według kryterium wytrzymałościowego:

$$\begin{aligned} M_{fi,t,Rd} &= M_{pl,Rd,20^{\circ}\text{C}} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi}} \cdot \frac{1}{K_1 \cdot K_2} = \\ &= (12875 \cdot 10^3 \cdot 355 / 1.1) \cdot 0.36 \cdot \frac{1.1}{1.0} \cdot \frac{1.0}{1.0 \times 1.0} \cdot 10^{-6} = \\ &= 1645.4 \text{ kNm} \end{aligned}$$

gdzie:

$$k_{y,\theta} = 0.360$$

$$K_1 = 1.0$$

$$K_2 = 1.0$$

$$\frac{M_{fi,d}}{M_{fi,t,Rd}} = \frac{1427.1}{1645.4} = 0.87 < 1$$

PODSUMOWANIE

- **PN-EN 1993-1-2** dostarcza narzędzi pozwalających do dokonania wiarygodnej oceny nośności konstrukcji stalowych narażonych na termiczne oddziaływania pożarowe.
- **Nośność konstrukcji stalowych może być łatwo zweryfikowana przy zastosowaniu prostych modeli obliczeniowych.**
- **Zaproponowane metody analizy pozwalają na ocenę zarówno elementów wewnętrznych i zewnętrznych konstrukcji.**

LITERATURA



Program
Uczenie się
przez całe życie

LITERATURA

- PN-EN 1993-1-1:2007 – Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych - Część 1-2: Reguły ogólne – Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2007
- PN-EN 1991-1-2:2006 – Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-2: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2006
- PN-EN 1990:2004 – Eurokod – Podstawy projektowania konstrukcji, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2004
- ENV 1993-1-2 – General rules, Structural fire design, CEN, Brussels 1995
- ECCS Technical Note 92, Explanatory Documents to ECCS No 89, Fire resistance of steel structures, Brussels 1996



Program Uczenie się przez całe życie

Moduły szkoleniowe SKILLS zostały opracowane przez konsorcjum organizacji, podanych na dole slajdu.
Materiał jest w objęty licencją Creative Commons 

Ten projekt został zrealizowany przy wsparciu finansowym Komisji Europejskiej.
Publikacje w ramach tego projektu odzwierciedlają jedynie stanowisko ich autorów i Komisja Europejska
nie ponosi odpowiedzialności za umieszczoną w nich zawartość merytoryczną.

