



NAVRHOVÁNÍ OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ NA ÚČINKY POŽÁRU

ČSN EN 1993-1-2

Ing. Jiří Jirků

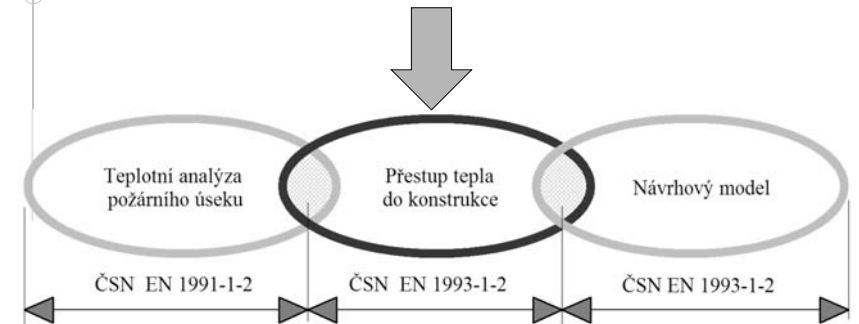
Ing. Zdeněk Sokol, Ph.D.

Prof. Ing. František Wald, CSc.

1

2

Stanovení požární odolnosti



Přestup tepla do konstrukce v ČSN EN 1993-1-2



▪ Pokročilé modely



▪ MKP

▪ Zjednodušené modely

- Výpočet teploty nechráněných prvků
- Výpočet teploty chráněných prvků

3

Přestup tepla do konstrukce v ČSN EN 1993-1-2



▪ Pokročilé modely

- Princip obecné teorie přestupu tepla
- Vliv změny tepelných vlastností
- Ověření výpočtů – parametrická studie

4

Přestup tepla do konstrukce v ČSN EN 1993-1-2



■ Pokročilé modely

■ MKP

■ Zjednodušené modely

➔ ■ Výpočet teploty nechráněných prvků

■ Výpočet teploty chráněných prvků

5

Přestup tepla



Rovnováha mezi **teplem přijatým povrchem prvku** v časovém intervalu Δt a **přírůstkem teploty prvku**

Teplu přijaté povrchem

$$A_m h_{net,d} \Delta t = \rho_a V c_a \Delta \theta_{a,t}$$

Zvýšení teploty materiálu

kde

- A_m je povrch prvku [m^2] na jednotku délky
- $h_{net,d}$ je návrhová hodnota tepelného toku od proudění a sálání vztažená na jednotku plochy
- Δt je časový interval v sekundách
- ρ_a objemová hmotnost oceli [$\rho_a = 7850 \text{ kg} / m^3$]
- V je objem prvku [m^3] na jednotku délky
- c_a je měrné teplo oceli [zjednodušeně $c_a = 650 \text{ J/kg K}$]
- $\Delta \theta_{a,t}$ je přírůstek teploty

6

Nechráněné prvky



Za předpokladu rovnoměrného rozložení teploty po průřezu je **přírůstek teploty** v časovém intervalu Δt

$$\Delta \theta_{a,t} = \frac{A_m / V}{c_a \rho_a} h_{net,d} \Delta t$$

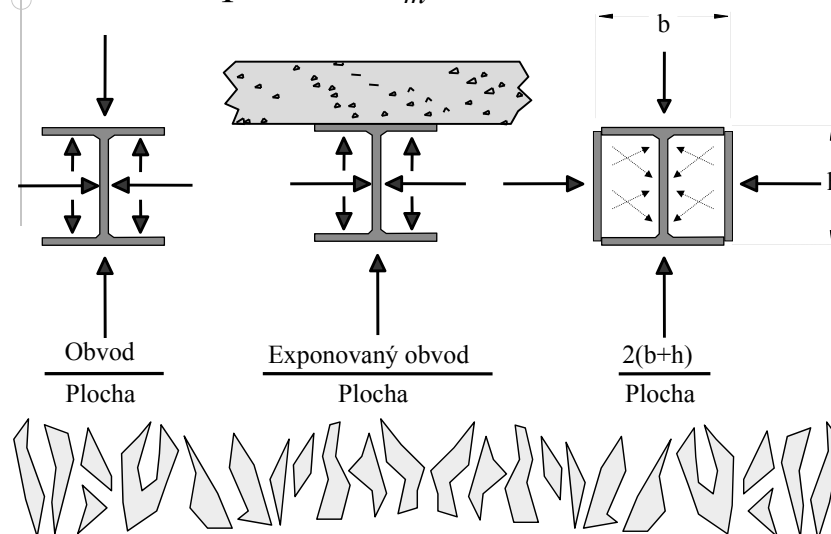
kde A_m / V je součinitel průřezu [m^{-1}].

- neplatí pro menší hodnoty než 10 m^{-1}
- pro hodnoty nad 200 m^{-1} již nemá řešení praktický význam, protože $\theta_{a,t} \equiv \theta_{g,t}$
- časový interval Δt se nemá brát větší než 5 s

➔ Vzrůst teploty oceli v čase závisí na součiniteli průřezu A_m / V .

7

Součinitel průřezu A_m / V



8

Vliv stínění

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

Zjednodušeně se uplatňuje pro celkový tepelný tok

- $k_{sh} = 1$ pro uzavřené konvexní průřezy (neuplatní se vliv stínění)
- $k_{sh} = 0,9 (A_m/V)_b / (A_m/V)$ pro průřezy tvaru I a normovou teplotní křivku
- $k_{sh} = (A_m/V)_b / (A_m/V)$ pro ostatní průřezy

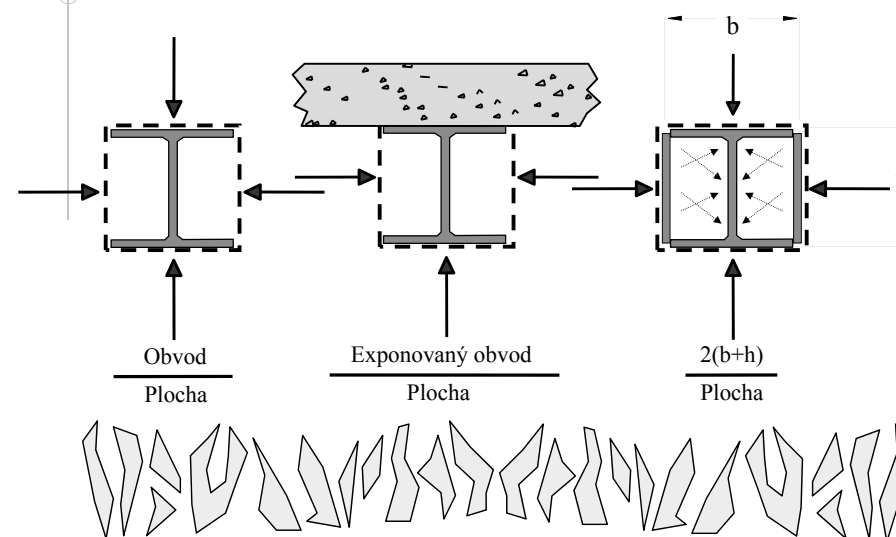
Prakticky pro I průřezy:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} h_{net,d} \Delta t = 0,9 \frac{(A_m/V)_b}{A_m/V} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} h_{net,d} \Delta t = 0,9 \frac{(A_m/V)_b}{c_a \rho_a} h_{net,d} \Delta t$$

→ Pro výpočet se používá součinitel $(A_m/V)_b$

9

Součinitel průřezu $(A_m/V)_b$



10

Tepelný tok

Celkový tepelný tok h_{net} se stanoví jako součet účinků **proudění** a **sálání** v okolí prvku a jeho návrhová hodnota se určí ze vztahu

$$h_{net,d} = h_{net,c} + h_{net,r}$$

kde

$h_{net,c}$ složka přestupu tepla prouděním na jednotku plochy [W/m^2]

$h_{net,r}$ složka přestupu tepla sáláním na jednotku plochy [W/m^2]

11

Přestup tepla prouděním

Složka tepelného toku prouděním na jednotku plochy [W/m^2] se stanoví ze vztahu

$$h_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m)$$

kde

α_c je součinitel přestupu tepla prouděním

- $\alpha_c = 25 W/m^2K$ při použití normové teplotní křivky
- $\alpha_c = 35 W/m^2K$ při použití parametrické teplotní křivky
- $\alpha_c = 50 W/m^2K$ při použití uhlovodíkové teplotní křivky
- $\alpha_c = 35 W/m^2K$ při použití zónových modelů, modelu lokálního požáru

θ_g je teplota plynů v okolí prvku [$^{\circ}C$]

θ_m povrchová teplota prvku [$^{\circ}C$]

12

Přestup tepla sáláním

Sálavá složka tepelného toku na jednotku plochy [W/m^2] se stanoví ze vztahu

$$h_{net,r} = \phi \varepsilon_{res} 5,67 \cdot 10^{-8} [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4]$$

kde

ϕ je polohový faktor, zpravidla $\phi = 1,0$

ε_{res} výsledná emisivita, viz další stránka

θ_r sálavá teplota okolí prvku [$^{\circ}C$], lze ji považovat za rovnou teplotě plynů θ_g

θ_m povrchová teplota prvku [$^{\circ}C$]

$5,67 \cdot 10^{-8}$ Stefan-Boltzmannova konstanta [$W/(m^2 K^4)$]

13

Výsledná emisivita

$$\varepsilon_{res} = \varepsilon_f \varepsilon_m$$

ε_f je emisivita vztažená k požárnímu úseku, obvykle 1,0

ε_m je emisivita vztažená k povrchu materiálu

- pro běžné ocelové prvky se počítá s hodnotou 0,7
- pro prvky z nerezové oceli 0,4
- pro prvky z hliníkových slitin 0,3 (bez nátěru)
0,7 (s nátěrem)

Emisivita se mění v průběhu hoření (koncentrace pevných částic ve spalínách) a její hodnota má zásadní význam na přesnost řešení.

14

Přírůstková metoda

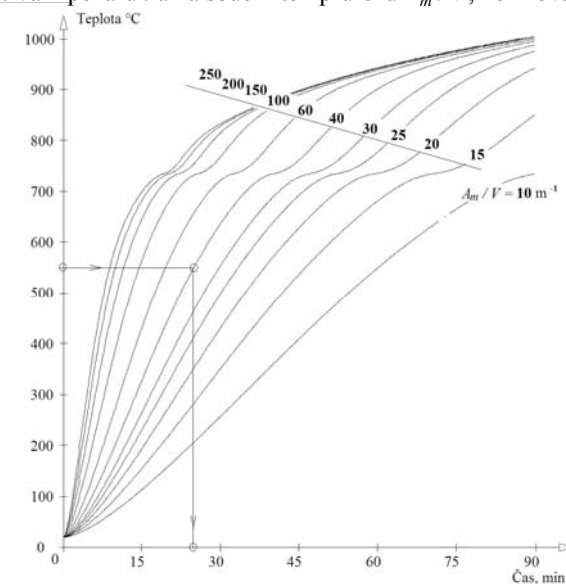
$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} h_{net,d} \Delta t$$

výpočet v tabulce (excel)

t		t		θ_g	složky tepelného toku			měrné teplo oceli	přírůstek teploty	teplota průřezu v čase t
min	sec	min	sec	$^{\circ}C$	$h_{net,r}$	$h_{net,c}$	$h_{net,d}$	c_a	$\Delta\theta_{a,t}$	$\theta_{a,t}$
0	0	0	0	20,0	0	0	0	J/kg K	0,00	20,0
0	5	0,083	96,5	448	2679	3126	440	440	1,18	21,2
0	10	0,167	147,0	937	4402	5339	441	441	2,00	23,2
0	15	0,250	184,6	1435	5650	7085	442	442	2,65	25,8
0	20	0,333	214,7	1928	6610	8538	444	444	3,18	29,0
0	25	0,417	239,7	2412	7374	9787	446	446	3,63	32,6
0	30	0,500	261,1	2885	7998	10882	448	448		

15

Graf závislosti teploty ocelového nechráněného profilu $\theta_{a,t}$ na době trvání požáru t a na součiniteli průřezu A_m/V , normová křivka



16

Přestup tepla do konstrukce



▪ Pokročilé modely

▪ MKP

▪ Zjednodušené modely

▪ Výpočet teploty nechráněných prvků

➔ ▪ Výpočet teploty chráněných prvků

17

Přírůstek teploty chráněného průřezu

Princip: vedení tepla vrstvou ochranného materiálu

$$\Delta\theta_a = \frac{K_{ins}}{\rho_a c_a} \cdot \frac{A_m}{V} \cdot (\theta_g - \theta_a) \cdot \Delta t$$

Součinitel K_{ins} závisí na vlastnostech ochranného materiálu

λ_p tepelné vodivosti

ρ_p hustotě

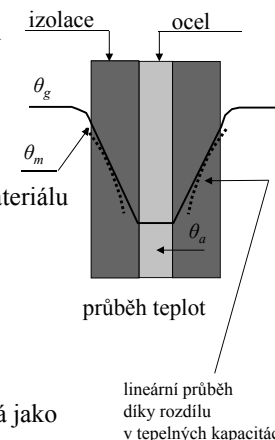
c_p měrné teple

d_p tloušťce

Pro lehkou izolaci $K_{ins} \approx \lambda_p / d_p$

Povrchová teplota ochranné vrstvy je přibližně stejná jako teplota plynů

$$\theta_g - \theta_m \ll \theta_m - \theta_a$$



18

Výpočet teploty chráněných prvků

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

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

$$\Delta\theta_{a,t} \geq 0$$

λ_p tepelná vodivost požárně ochranného materiálu [$W / m K$]

A_p / V součinitel průřezu pro chráněné prvky [m^{-1}]

d_p tloušťka požárně ochranného materiálu [m]

ρ_p objemová hmotnost požárně ochranného materiálu [kg/m^3]

ρ_a objemová hmotnost oceli [$\rho_a = 7850 kg/m^3$]

c_p měrné teplo požárně ochranného materiálu [$J / kg K$]

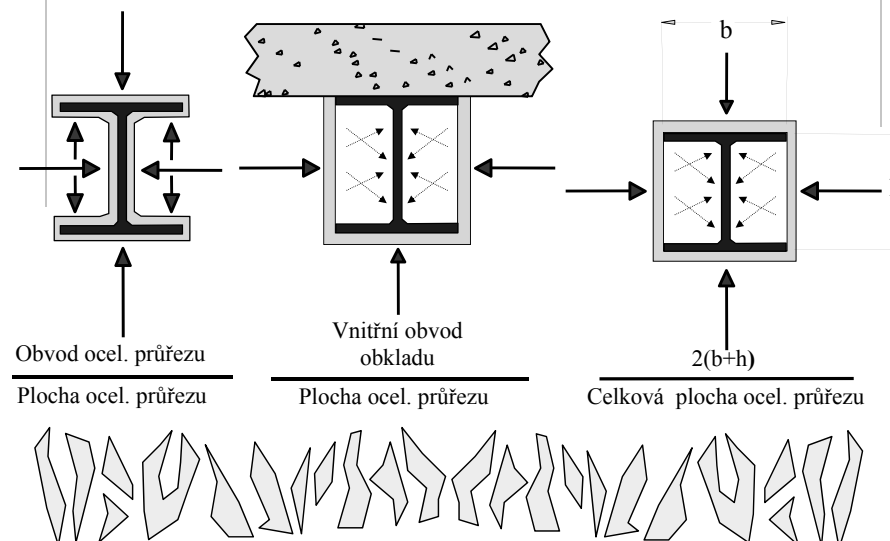
c_a měrné teplo oceli

$\Delta\theta_{g,t}$ pro přírůstek okolní teploty během časového intervalu

Δt v sekundách, který se nemá brát větší než 30 sekund

19

Součinitel průřezu A_p/V – chráněný průřez



20

Přírůstková metoda

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

výpočet v tabulce (excel)

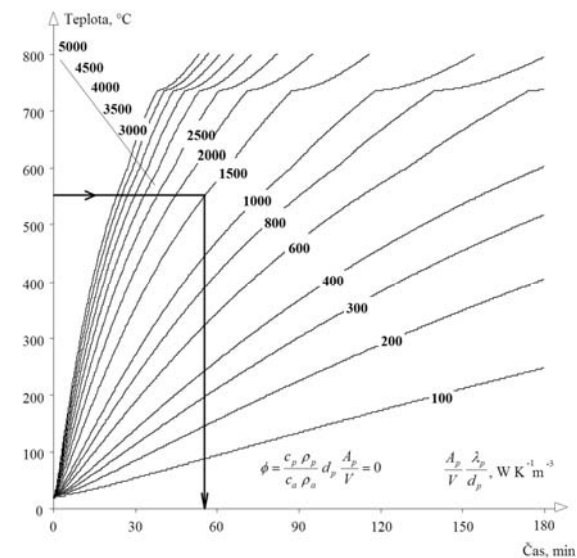
teplota plynů (podle zvolené teplotní křivky - modelu) přírůstek teploty

měrné teplo oceli vlastnosti ochranného materiálu teplota průřezu v čase t

t	t	θ_g	c_a	c_p	λ_p	ϕ	$\Delta\theta_{a,t}$	$\theta_{a,t}$
min	sec	min	J/kg K	J/kg K				
0	0	20.0	440	1700	0.2	2.044		20.0
0	30	0.500	96.5	440	1700	0.2	2.045	0.0
1	0	1.000	147.0	440	1700	0.2	2.045	0.0
1	30	1.500	184.6	440	1700	0.2	2.045	0.0
2	0	2.000	214.7	440	1700	0.2	2.045	0.0
2	30	2.500	239.7	440	1700	0.2	2.045	0.0
3	0	3.000	261.1	440	1700	0.2	2.045	0.0
3	30	3.500	262.1	440	1700	0.2	2.045	0.5
4	0	4.000	263.1	440	1700	0.2	2.043	1.7
4	30	4.500	264.1	441	1700	0.2	2.038	2.6
5	0	5.000	265.1	443	1700	0.2	2.030	3.3
5	30	5.500	266.1	445	1700	0.2	2.019	3.9
6	0	6.000	267.1	448	1700	0.2	2.007	4.3
6	30	6.500	268.1	451	1700	0.2	1.995	4.7
7	0	7.000	269.1	454	1700	0.2	1.981	5.0
7	30	7.500	270.1	457	1700	0.2	1.968	5.2
8	0	8.000	271.1	460	1700	0.2	1.954	5.4

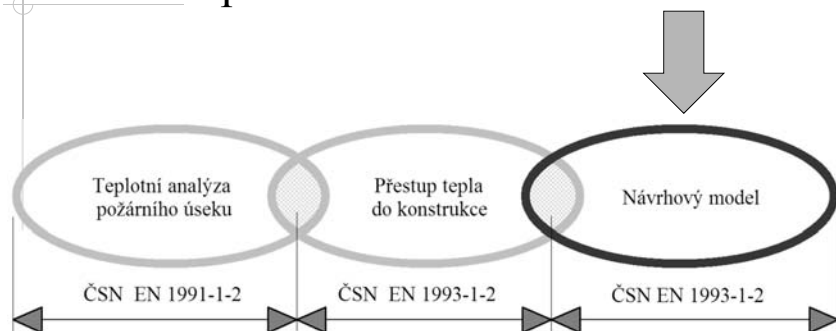
21

Graf závislosti teploty ocelového chráněného profilu $\theta_{a,t}$ na době trvání požáru t a na součiniteli průřezu A_p/V , normová křivka



22

Stanovení požární odolnosti



23

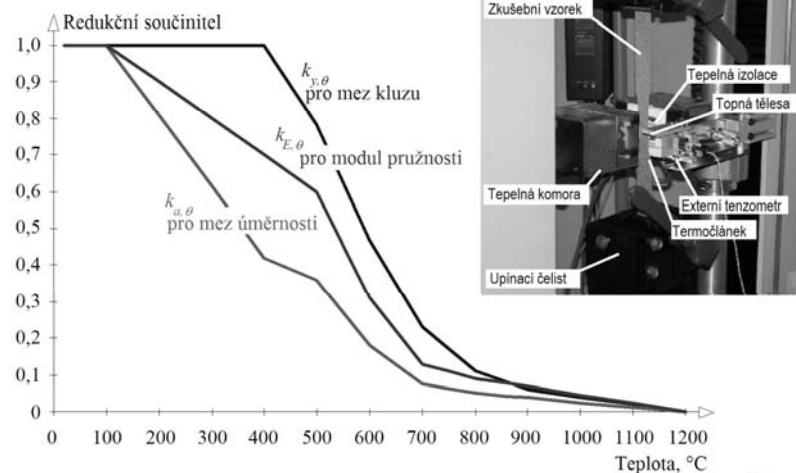
Návrh za zvýšené teploty

- Materiál za zvýšené teploty
- Návrhové modely
 - Pokročilé – MKP
 - Jednoduché
 - Z návrhu za běžné teploty – redukční souč.
 - Prosté namáhání
 - Metoda kritické teploty
 - Stabilitní jevy
 - Vzpěr, klopení, lokální boulení
- Styčníky

24

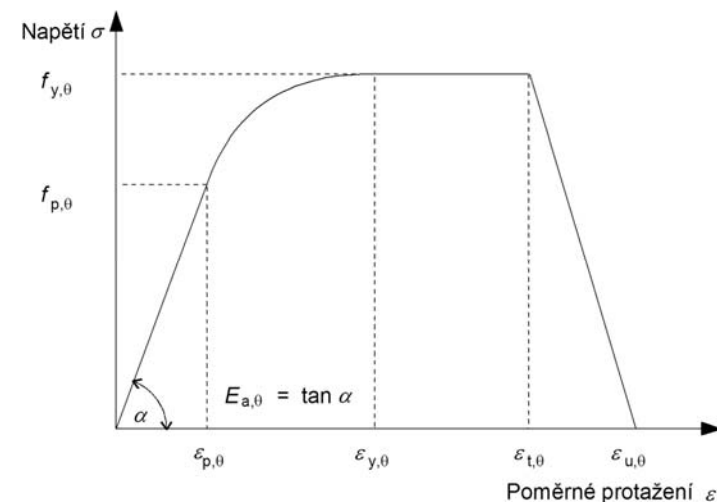
Vlastnosti oceli při vysokých teplotách

Redukční součinitel



25

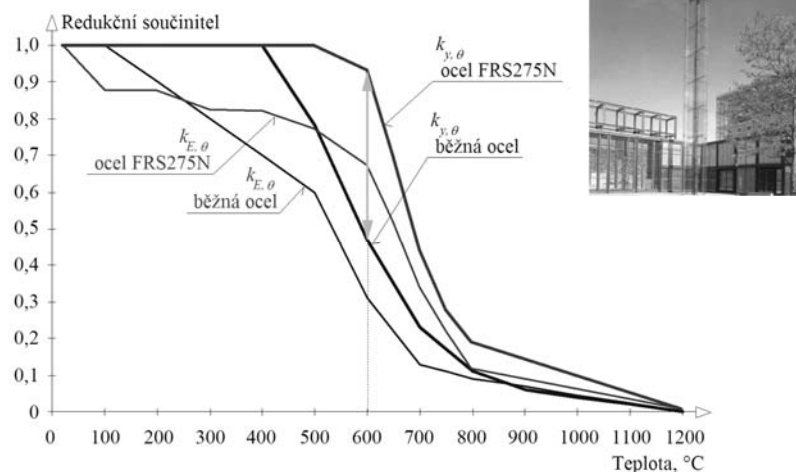
Pracovní diagram oceli



26

Požárně odolná ocel FRS275N

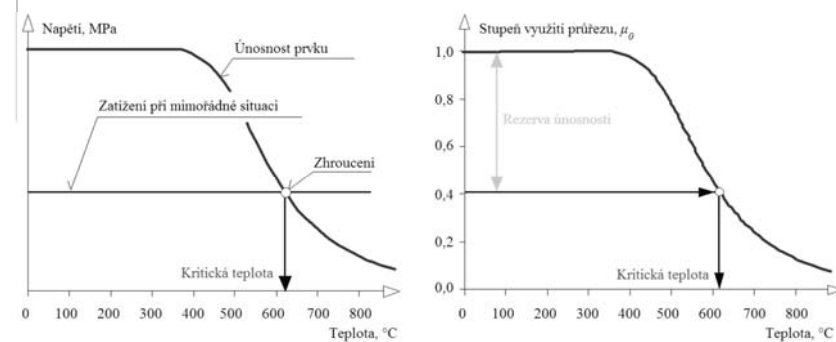
Zvýšení meze kluzu při 600°C



27

Metoda kritické teploty

Pro prosté chování



Porovnává se kritická teplota s teplotou dosaženou v čase požadované požární odolnosti

28

Kritická teplota

Platí jen pro prvky, jejichž únosnost závisí pouze na mezi kluzu (tzn. nedochází ke ztrátě stability)

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right) + 482$$

Stupeň využití průřezu μ_0

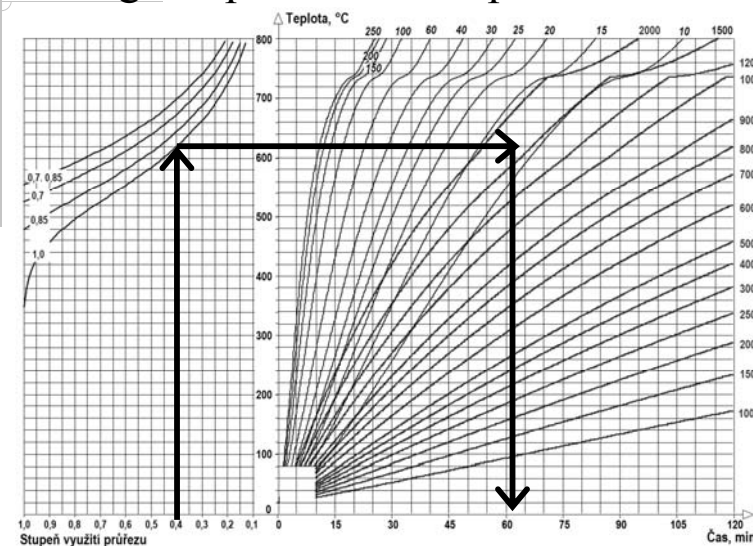
$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}$$

Účinek zatížení při požární situaci

Únosnost při požární situaci při běžné teplotě (20°C)

29

Nomogram pro stanovení požární odolnosti



stupeň využití průřezu - podmínky působení - součinitel průřezu - požární odolnost

Nosníky (bez ztráty stability), 1. a 2. třída

Rovnoměrné rozdělení teploty po průřezu (konstantní teplota)

$$M_{fi,t,Rd} = \frac{W_{pl,y} k_{y,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

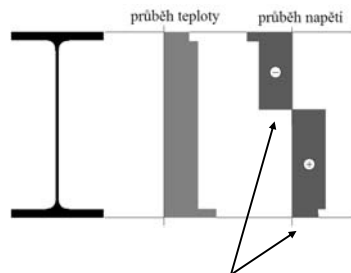
Nerovnoměrné rozdělení teploty po průřezu (obecná metoda)

- poloha neutrální osy

$$N^+ = N^-$$

- moment únosnosti

$$M_{fi,t,Rd} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i k_{y,\theta,i} z_i f_y}{\gamma_{M,fi}}$$



Redukce meze kluzu pomocí součinitelů $k_{y,\theta}$
podle dosažené teploty průřezu

31

Nosníky (bez ztráty stability), 1. a 2. třída

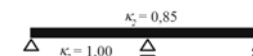
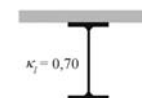
Nerovnoměrné rozdělení teploty po průřezu (alternativní metoda)

$$M_{fi,t,Rd} = \frac{1}{\kappa_1 \kappa_2} \frac{W_{pl,y} k_{y,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

jako pro konstantní teplotu v průřezu
vliv nerovnoměrného rozložení teploty

Součinitele podmínek působení

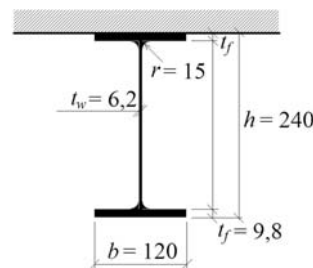
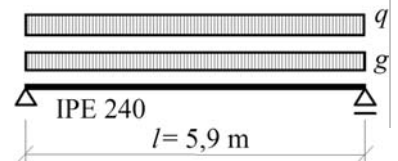
- Součinitel κ_1 pro nerovnoměrné rozdělení teploty po průřezu
 $\kappa_1 = 1,00$ pro nosník vystavený požáru ze čtyř stran
 $\kappa_1 = 0,70$ pro nosník vystavený požáru ze tří stran,
s betonovou deskou na čtvrté straně
- Součinitel κ_2 pro nerovnoměrné rozdělení teploty podél
nosníku
 $\kappa_2 = 0,85$ pro podporové momenty staticky neurčitých nosníků
 $\kappa_2 = 1,00$ pro ostatní případy



32

Řešený příklad – prostý nosník

Navrhněte prostý nosník s rozpětím 5,9 m, zatížený rovnoměrným spojitým zatížením. Stálé zatížení je $g_k = 3,8$ kN/m, proměnné zatížení $q_k = 5,8$ kN/m. Stabilitu tlačené pásnice nosníku zajišťuje ocelobetonová deska. Použijte ocel S 275. Předpokládejte nárůst teploty v požárním úseku podle nominální normové teplotní křivky, ověřte požární odolnost R 15.



Navržen nosník průřezu IPE240

Za běžné teploty vyhovuje (není zde prokazováno), rozhoduje MSP

33

Vnitřní síly za požáru

Redukční součinitel η_{fi} pro zatížení při požáru

$$\eta_{fi} = \frac{g_k + \psi_{1,i} q_k}{g_k \gamma_G + q_k \gamma_Q} = \frac{3,8 + 0,3 \cdot 5,8}{3,8 \cdot 1,35 + 5,8 \cdot 1,5} = 0,401$$

Ohybový moment působící při požáru

$$M_{fi,Ed} = \eta_{fi} M_{Ed} = 0,401 \cdot 60,2 = 24,1 \text{ kNm}$$

Momentová únosnost při požáru při teplotě 20°C

$$M_{fi,\theta,Rd} = \frac{W_{pl,y} k_{y,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} = \frac{366,6 \cdot 10^3 \cdot 1,0 \cdot 275}{1,0} = 100,8 \text{ kNm}$$

Vliv nerovnoměrného rozdělení teploty

nosník s betonovou deskou $\rightarrow \kappa_1 = 0,7$

prostý nosník $\rightarrow \kappa_2 = 1,0$

$$M_{fi,Rd} = \frac{M_{fi,\theta,Rd}}{\kappa_1 \kappa_2} = \frac{100,8}{0,7 \cdot 1,0} = 144,0 \text{ kNm}$$

34

Kritická teplota

Stupeň využití průřezu při požáru

$$\mu_{\theta} = \frac{M_{fi,Ed}}{M_{fi,Rd}} = \frac{24,1}{144,0} = 0,168$$

Kritická teplota

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_{\theta}^{3,833}} - 1 \right] + 482 = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot 0,168^{3,833}} - 1 \right] + 482 = 751^{\circ}\text{C}$$

35

Dosažená teplota

Součinitel průřezu

opsaný obdélník, část zakrytá deskou se nezapočítává

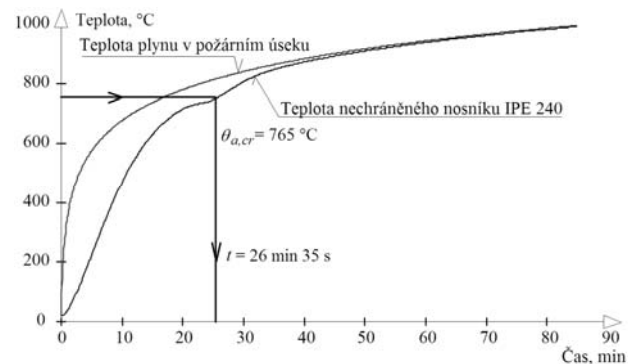
$$\left(\frac{A_m}{V} \right)_b = \frac{b + 2h}{A} = \frac{120 + 2 \cdot 240}{3912} = 0,153$$

Výpočet dosažené teploty přírůstkovou metodou (excel) nebo odečtením z grafu

$$\rightarrow \theta_a = 631^{\circ}\text{C}$$

36

Vyhodnocení



Posouzení

Kritická teplota
 $\theta_{a,cr} = 765^{\circ}\text{C}$

Dosažená teplota
 $\theta_a = 631^{\circ}\text{C}$

Nosník za zvýšené teploty **vyhoví**.

37

Shrnutí

ČSN EN 1993-1-2

▪ Přestup tepla do konstrukce

- Pokročilé modely - MKP
- Zjednodušené modely
 - Výpočet teploty nechráněných prvků
 - Výpočet teploty chráněných prvků

▪ Modelování za zvýšené teploty

- Pokročilé modely - MKP
- Zjednodušené modely
 - Vlastnosti materiálu za zvýšené teploty
 - Prvky prostě namáhané
 - Prvky se stabilitními jevy
 - Styčníky



38

Děkuji za pozornost

39