

Lenka LAUSOVÁ¹

MOMENTOVÁ ÚNOSNOST OCELOVÉ KONSTRUKCE ZA POŽÁRU

ULTIMATE MOMENT OF BENDING ON STEEL FRAME DURING FIRE

Abstrakt

Tato práce srovnává normový způsob výpočtu kritické teploty u ocelové konstrukce a možné chování staticky neurčitého rámu během požáru z hlediska dosažení momentové únosnosti. Jsou porovnány normové hodnoty času dosažení kritické teploty a naprogramovaný postup v programu Excel. Jsou ukázány výhody plastického chování materiálu u konstrukcí s možností vzniku plastických kloubů.

Abstract

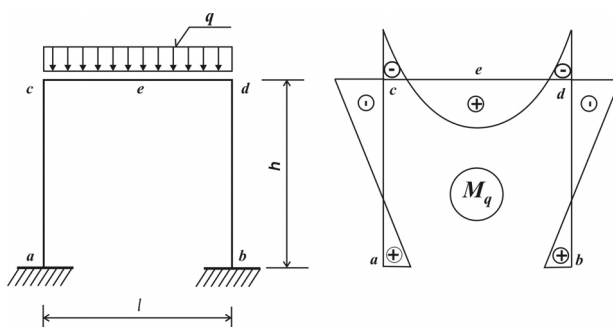
This paper compares a standard way of determining of critical temperature in steel construction and a possible behaviour of a symmetric statically indeterminate steel frame during fire from the aspect of bending moments and a load carrying capacity. There are shown advantages of steel constructions especially use of plastic joints.

1 ÚVOD

V tomto článku je ukázáno srovnání výpočtů dosažení momentové únosnosti v čase požáru na staticky neurčitě ocelové konstrukci. Jsou porovnány hodnoty času dosažení kritické teploty a naprogramovaný postup v programu Excel, kdy je počítáno s možností vzniku plastických kloubů a kde kromě obvyklých změn materiálových a tepelně technických charakteristik jsou hodnoty ohybových momentů v krocích redukovány snižujícím se modulem pružnosti v tahu a tlaku.

2 ŘEŠENÁ RÁMOVÁ KONSTRUKCE

V příkladě je řešena nechráněná ocelová konstrukce viz obr.1 z materiálu S275. Pro jednoduchost je zvolen konstantní profil HE-A 300, rozpětí l i výška rámu h jsou 3 m. Zatížení q je symetrické spojitě rovnoměrné na příčli rámu. Jsou řešeny dvě varianty zatížení na stejném rámu.



Obr.1: Schéma řešené konstrukce a ohybové momenty od zatížení q .

¹ Ing. Lenka Lausová, Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební (FAST), Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 326, e-mail: lenka.lausova@vsb.cz.

- varianta A: stálé zatížení o charakteristické hodnotě $q_{A,k}=200\text{kN/m}$ a
- varianta B: stálé zatížení o charakteristické hodnotě $q_{B,k}=400\text{kN/m}$.

Přepočet zatížení na návrhovou hodnotu: $q_{A,d}=200 \cdot 1,35=270\text{kN/m}$, $q_{B,d}=400 \cdot 1,35=540\text{kN/m}$.
Za pokojové teploty rám vyhoví podle mezního stavu únosnosti i použitelnosti.

3 VÝPOČET PODLE KRITICKÉ TEPLOTY

3.1 Předpoklady

- rám je zatížen rovnoměrnou změnou teploty po výšce i délce
- není uvažován vznik plastických kloubů
- není řešena kombinace napětí

3.2 Určení kritické teploty

Při výpočtu požární odolnosti konstrukce zatížené ohybovými momenty je momentová únosnost vyčerpána dosažením teploty v konstrukci rovné kritické teplotě θ_{cr} . Čas, kdy bude dosaženo kritické teploty v konstrukci, lze určit přibližně pomocí grafu podle [1] nebo přesněji výpočtem také podle [1]. Pro použití grafu je třeba určit hodnoty stupně využití průřezu při požáru μ_0 viz (1) a součinitele průřezu A_m/V viz (7) a přímo lze odečíst hodnotu a čas dosažení kritické teploty. Výpočtem se čas dosažení kritické teploty určí například pomocí iterační přírůstkové metody, kdy se přírůstek teploty v nechráněném ocelovém průřezu určí podle vztahu (8).

Kritická teplota θ_{cr} závisí na stupni využití průřezu při požáru μ_0 :

$$\mu_0 = \frac{M_{fi,Ed}}{M_{fi,t,Rd}} \quad (1)$$

kde:

$M_{fi,Ed}$ – ohybový moment pro požární návrhovou situaci [kNm] viz (4) a

$M_{fi,t,Rd}$ – celková momentová únosnost při požáru v čase $t=0$ [kNm] viz (6).

Výpočet kritické teploty θ_{cr} :

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad (2)$$

Redukce momentu od mechanického zatížení na zatížení při požáru $M_{fi,Ed}$ se vypočte pomocí redukčního součinitele η_{fi} (záleží na podílu stálého a proměnného zatížení, v tomto příspěvku je uvažováno pouze stálé zatížení):

$$\eta_{fi} = \frac{E_{fi,d}}{E_d} = \frac{g_k + q_k \psi^{1,1}}{g_k \gamma_G + q_k \gamma_Q} = \frac{1}{1,35} = 0,74 \quad (3)$$

kde:

g_k – stálé zatížení [kN/m],

q_k – proměnné zatížení [kN/m] a

γ – součinitel příslušného zatížení.

Ohybový moment pro požární návrhovou situaci:

$$M_{fi,Ed} = \eta_{fi} M_{Ed} \quad (4)$$

Momentová únosnost za pokojové teploty pro profil HE-A300 se vypočte podle vztahu:

$$M_{fi,\theta,Rd} = \frac{W_y k_{y,\theta} f_{y,k}}{\gamma_{M,fi}} = \frac{1383 \cdot 1,00 \cdot 275}{1,00} = 380 \text{ kNm} \quad (5)$$

kde:

W_y – modul průřezu [m^3],

$k_{y,\theta}$ – redukční součinitel meze kluzu ($k_{y,\theta}=1,00$ pro teplotu 20°C v čase $t=0$),

f_{yk} – charakteristická hodnota meze kluzu a

$\gamma_{m,fi}$ – součinitel spolehlivosti materiálu pro požární situaci.

Momentová únosnost při požáru vlivem nerovnoměrného rozdělení teploty (pro čas $t=0$ a pokojovou teplotu):

$$M_{fi,t,Rd} = \frac{M_{fi,\theta,Rd}}{\kappa_1 \kappa_2} = 380,0 \text{ kNm} \quad (6)$$

kde:

κ_1, κ_2 – součinitelé nerovnoměrného rozdělení teploty po výšce a délce průřezu ($\kappa_1=\kappa_2=1$)

Součinitel průřezu:

$$\frac{A_m}{V} = \frac{2.290 + 2.300 + 2.(300 - 8,5)}{11,25 \cdot 10^3} = 0,157 \text{ mm}^{-1} = 157 \text{ m}^{-1} \quad (7)$$

Přírůstek teploty v konstrukci $\Delta\theta$ se počítá přírůstkovou metodou v programu Excel podle [1] a tímto postupem je přesně určen čas, kdy bude kritické teploty dosaženo. Lze také jednoduše pro dané hodnoty použít graf viz [1].

$$\Delta\theta = k_{sh} \frac{\frac{A_m}{V}}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad (8)$$

kde:

$\dot{h}_{net,d}$ – hustota tepelného toku [Wm^{-2}],

k_{sh} – součinitel vlivu zastínění,

A_m/V – součinitel průřezu [m^{-1}] viz (7),

Δt – časový krok [sec],

c_a – měrné teplo materiálu v závislosti na teplotě [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] a

ρ_a – měrná hmotnost materiálu [7850 kg.m^{-3}].

3.3 Varianta A – $q_{A,k} = 200 \text{ kN/m}$

$$M_{max} = M_c = M_d = M_e = M_{Ed} = -135 \text{ kNm}$$

Postupem uvedeným v odstavci 3.2 bude kritické teploty v konstrukci $\theta_{cr} = 685^\circ\text{C}$ dosaženo v 18. minutě jak výpočtem iterační přírůstkovou metodou, tak i ověřením podle grafu z normy [1].

3.4 Varianta B – $q_{B,k} = 400 \text{ kN/m}$

$$M_{max} = M_c = M_d = M_e = M_{Ed} = -270 \text{ kNm}$$

V tomto případě bude kritické teploty $\theta_{cr} = 576^\circ\text{C}$ dosaženo v 13. minutě. Výpočet je opět proveden postupem uvedeným v odstavci 3.2.

4 VÝSLEDKY VÝPOČTU V PROGRAMU EXCEL

Celý postup výpočtu tohoto třikrát staticky neurčitěho symetrického rámu je uveden v [4]. V tomto článku z něj budou převzaty nejdůležitější údaje potřebné k porovnání obou postupů výpočtu dosažení momentové únosnosti na daném rámu.

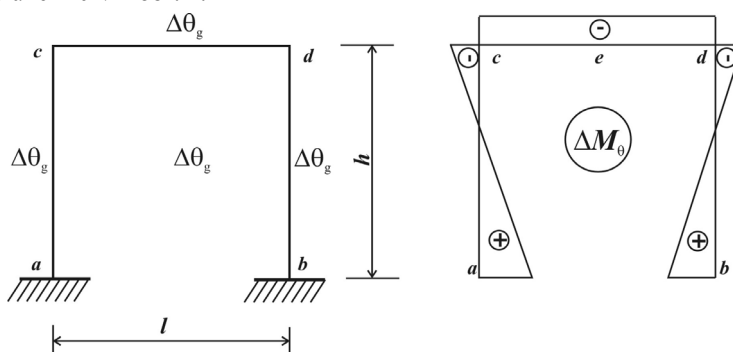
4.1 Předpoklady

- rám je zatížen rovnoměrnou změnou teploty po výšce i délce

- je počítáno s možností vzniku plastických kloubů na konstrukci
- není řešena kombinace napětí a změna normálových sil
- odvozené vztahy pro výpočet momentů platí pro konstantní průřez ($I = \text{konstanta}$)

V odstavci 3 je počítáno se změnami tepelně technických a materiálových charakteristik vlivem rostoucí teploty, je provedena redukce zatížení pro požární návrhovou situaci (zmenšená hodnota ohybových momentů viz (1)), ale není započítána změna ohybových momentů vlivem redukce modulu pružnosti v tahu a tlaku E a součinitele délkové roztažnosti α_t . V příspěvku [4] byly v programu Excel provedeny výpočty změn ohybových momentů (od vnějšího zatížení i od teploty) v rámových rozích a v uložení včetně redukce momentů vlivem změny E a α_t . Celkový moment byl výsledkem superpozice momentů. Při současném porovnávání s redukovanou momentovou únosností došlo ke vzniku prvních plastických kloubů v obou variantách v jiných místech. Byla sledována celková ztráta únosnosti konstrukce po vzniku dalších dvou plastických kloubů a vzniku mechanismu.

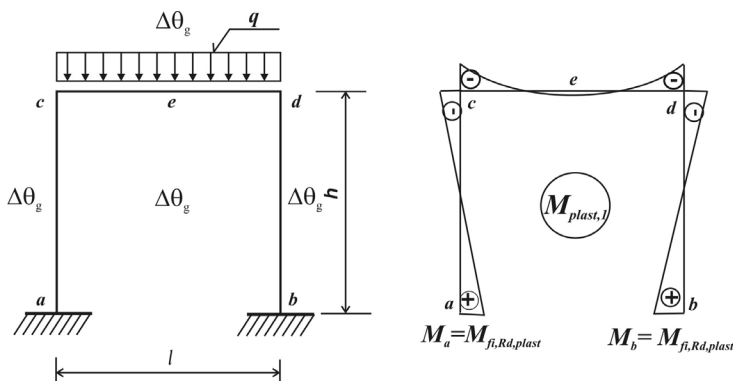
Průběh ohybových momentů od zatížení q viz obr.1 a průběh ohybových momentů od zatížení teplotou v konstrukci $\Delta\theta$ viz obr. 2.



Obr.2: Ohybové momenty na rámu od zatížení teplotou v pružném stavu.

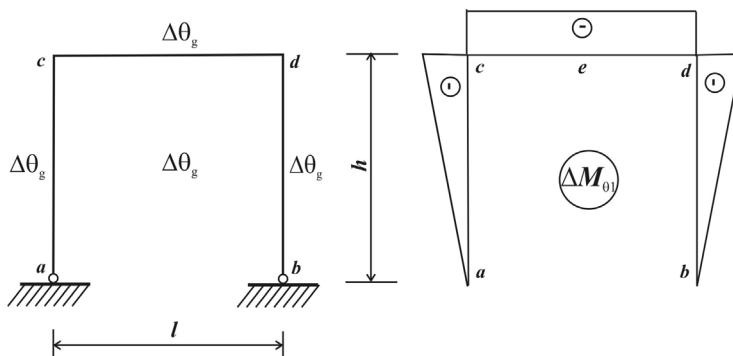
4.2 Varianta A

Při zatížení $q_{A,k}=200 \text{ kN/m}$ dojde k dosažení plastické momentové únosnosti za požáru $M_{fi,Rd,plast}$ současně v obou místech vetknutí viz obr.3.



Obr.3: Varianta A - plastické klouby v uložení.

Po dalším nárůstu teplotního zatížení vzniknou v bodech a a b plastické klouby a konstrukce se stane jedenkrát staticky neurčitou. Ohybové momenty od nárůstu teploty jsou počítány na změněné konstrukci z hlediska statického systému viz obr.4.

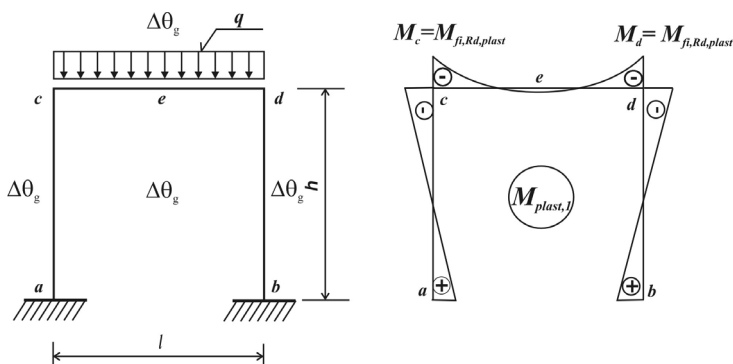


Obr.4: Varianta A – ΔM po vzniku prvních plastických kloubů v uložení.

Přírůstek ohybových momentů v rámových rozích c a d vlivem rostoucí teploty je přičítán k momentu $M_{plast,l}$ v bodech c a d . Po dosažení plastické únosnosti i v těchto rámových rozích dojde v nich současně k vzniku dalších dvou plastických kloubů na konstrukci a tím mechanismu.

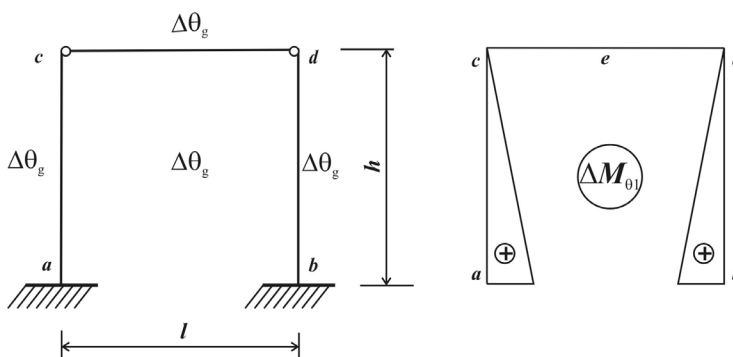
4.2 Varianta B

Při zatížení $q_{B,k}=400kN/m$ dojde při zvyšování teploty nejprve k dosažení plastické momentové únosnosti za požáru $M_{fi,Rd,plast}$ současně v rámových rozích c a d viz obr.5.



Obr.5: Varianta B - plastické klouby v rámových rozích.

Při dalším teplotním zatěžování se opět změní statický systém konstrukce na jedenkrát staticky neurčitý, narůstají ohybové momenty v uložení a a b viz obr.6.



Obr.6: Varianta B – ΔM po vzniku prvních plastických kloubů v rámových rozích.

Přírůstek těchto ohybových momentů ve vetknutí při změněném statickém systému je analogicky jako u varianty A přičítán k momentu $M_{plast,l}$ v bodech a a b , kde po dosažení $M_{fi,Rd,pl}$ opět vznikne mechanismus.

5 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

V tabulce 1 jsou uvedeny časy dosažení kritické teploty postupem popsáním v odstavci 3 v obou variantách a hodnoty momentových únosností a ohybových momentů postupem naznačeným v odstavci 4 v čase vzniku požáru ($t=0$), v čase vzniku prvních plastických kloubů a v čase vzniku mechanismu na konstrukci.

Tab. 1: Momentové únosnosti a ohybové momenty v čase t .

	výpočetní postup	čas	momentová únosnost za požáru $M_{fi,Rd,pl}$ [kNm]	ohybové momenty v čase t	
		t		podpory $M_a = M_b$ [kNm]	rámové rohy $M_c = M_d$ [kNm]
		[min]		[kNm]	[kNm]
varianta A $q_k = 200 \text{ kN/m}$	podle kritické teploty	18	0		
	program Excel	0	380	67,5	-135
		43	25	25 plastický kloub	-19
		52	21	25	-21 mechanismus
varianta B $q_k = 400 \text{ kN/m}$	podle kritické teploty	13	0		
	program Excel	0	380	135	-270
		35	33	32	-33 plastický kloub
		36	32	32 mechanismus	-33

6 ZÁVĚR

Z výsledků v tabulce 1 je patrné, že normový způsob výpočtu momentové únosnosti pomocí kritické teploty a postup v programu Excel se započtením vlivu zmenšujícího se modulu pružnosti v tahu a tlaku vlivem teploty a s možností využití plastických kloubů na konstrukci vede k poměrně rozdílným hodnotám dosažení momentové únosnosti konstrukce v čase trvání požáru.

LITERATURA

- [1] ČSN EN 1993-1-2. Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-2: *Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru*.
- [2] ČSN EN 1991-1-2. Eurokód 1: Zatížení konstrukcí, Část 1-2, *Obecná zatížení, Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*, Český Normalizační Institut, Praha, 2004.
- [3] Wald, F. a kolektiv: Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí, ČVUT Praha, 2005.
- [4] LAUSOVÁ L., Výpočet momentové únosnosti staticky neurčité ocelové rámové konstrukce za požáru. Mezinárodní konference *Modelování v mechanice*. Ostrava, 2009, str.49-50, ISBN 978-80-248-2016-3.
- [5] ČSN EN 1993-1-1. Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: *Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*.

Oponentní posudek vypracoval:

Ing. Miloslav Šeliga, STACAD, s.r.o.