

Teplota plynu při požáru patrové budovy

Požární zkouška pod vedením pracovníků z ČVUT v Praze na ocelobetonovém osmipodlažním skeletu v Cardingtonu byla zaměřena na chování styčnicků a ocelobetonové desky. Zkouška proběhla s podporou grantem pátého rámcového programu Evropské unie č. HPRI – CV 5535 dne 16. ledna 2003. Laboratoř na zkoušky velkého rozsahu byla představena v lednovém čísle časopisu Konstrukce [1]. Na přípravu zkoušky byl orientován předešlý článek [2]. Tento příspěvek je zaměřen na průběh hoření a na teplotu plynů v požárním úseku během zkoušky.

Přirozený požár

Cílem požární zkoušky bylo podrobnější poznání chování styčnicků konstrukce a ocelobetonové desky než u předešlých šesti experimentů [1] a [2]. Při její přípravě se uvažovalo s více scénáři. Bylo možno optimalizovat mechanické zatížení, požární zatížení a ventilaci. Mechanické zatížení pytlí s pískem o váze 1 100 kg bylo voleno co nejvyšší a představovalo stálé zatížení $3,65 \text{ kN/m}^2$ a nahodilé zatížení $3,50 \text{ kN/m}^2$, viz [3]. Požární zatížení 40 kg/m^2 bylo vybráno jako typické pro administrativní moderní budovu. Výpočty i předcházející zkoušky v Cardingtonu (č. 4 a 5) prokázaly, že zvyšování požárního zatížení nevede nutně k nárůstu teploty v požárním úseku. Případné prostorové vzplanutí zrychlí výdej energie i teplotu v požárním úseku, ale sníží teploty v konstrukci. Okno bylo s ohledem na vyšetřování styčnicků původně navrženo o výšce 1,7 m. Bohatá ventilace úseku by umožnila dosažení vysoké teploty v krátkém čase. Předpokládalo se, že při tomto scénáři, budou přípoje nosníků vystaveny největší změně vnitřních sil a budou dobře viditelné video a termo kamerami. Z více variant byl po zvážení cílů experimentu zvolen okenní otvor o výšce 1,27 m a šířce 8,7 m, který zvyšoval možnost místního kolapsu ocelobetonové desky. Navržený přívod vzduchu umožnil rychlý nárůst teploty v požárním úseku, dosažení vysokých hodnot teplot i dostatečné prohřátí ocelobetonové desky.

Během rozvinutého požáru, viz obr. 1, šlehaly plameny pouze 3 m z požárního úseku. Mezního stavu celistvosti ocelobetonové desky bylo dosaženo až v 54 minutě, na počátku chladnutí plynů, experimentu rozevřením trhliny u sloupu E2. Po požáru zbylo v požárním úseku na zemi malé množství popela, viz obr. 2. Stěny ze tří vrstev sádkartonových desek zachovaly celistvost. Na záběru je vidět veliký průhyb stropu požárního úseku. Největší dosažený průhyb, který byl v desce, nebyl zaznamenán průhyboměrem. Měřicí zařízení umožňovalo odečítat průhyboměry pouze do 1000 mm. Ze záběrů video kamery umístěné na pátém podlaží a termo kamery z konstrukce objektu hangáru se potvrdilo, že největší průhyb ocelobetonové desky přesáhl 1,2 m. Po požáru byla naměřena zbytková deformace stropu 925 mm.

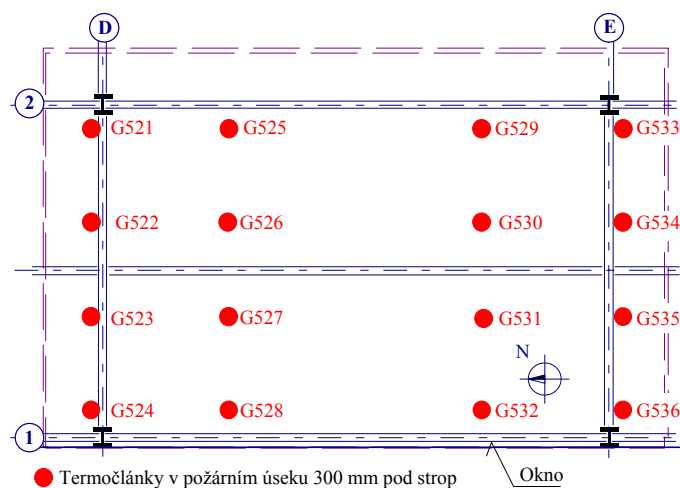


Obr. 1 Pohled na požární úsek ve 39 minutě plně rozvinutém požáru

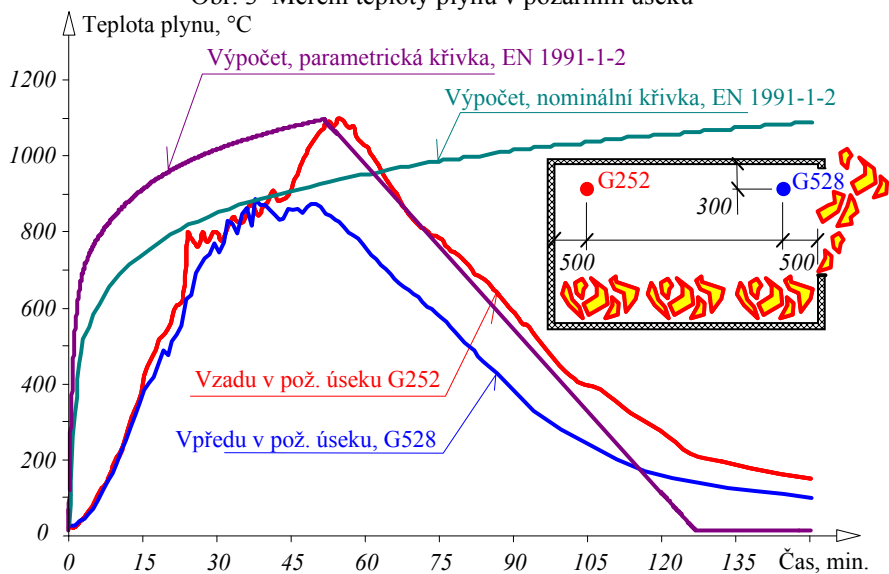


Obr. 2a) Požární úsek po požáru, b) zbytková deformace ocelobetonové desky 925 mm

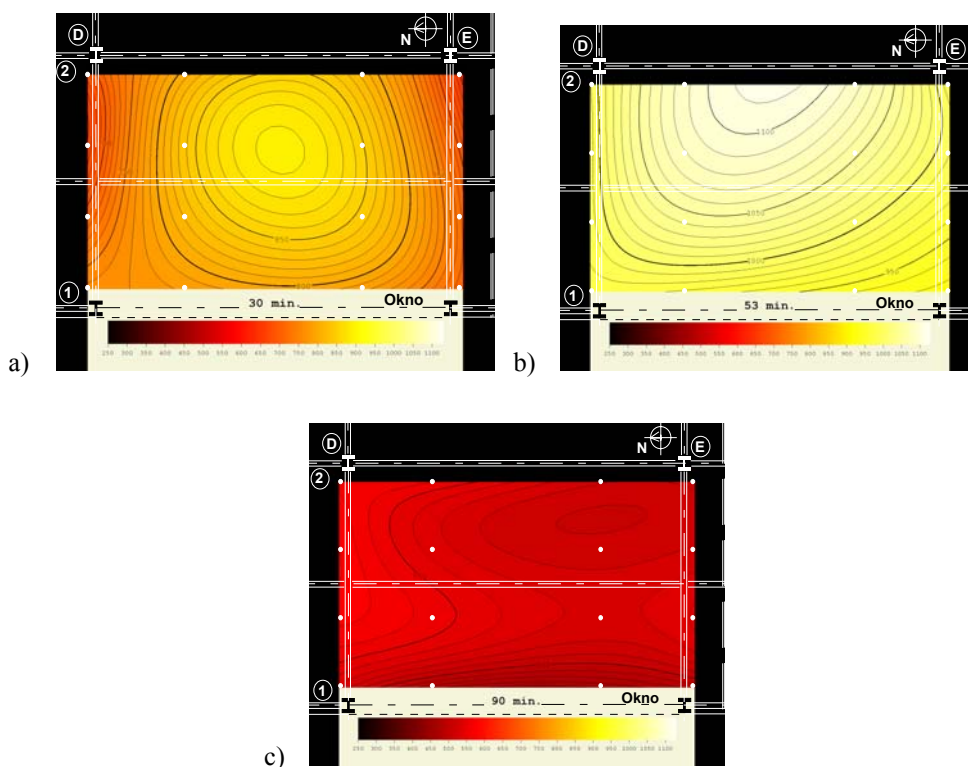
Termočlanky snímaly teplotu v požárním úseku 300 mm pod stropem. Jejich rozmístění je zobrazeno na obr. 3. Obr. 4 popisuje rozvoj teploty v čase. Nejvyšší teplota 1107,8 °C byla naměřena na termočlanku G525 2 250 mm od sloupu D2 v 54 minutě požáru. Na teplotní křivce je možno rozlišit tři fáze. Prudký nárůst teploty v požárním úseku trval asi do 24 minuty požáru. V této části byl požár řízen odhoříváním paliva. Ve druhé části, za vysokých teplot, byl od 24 minuty požár řízen ventilací. Od 55 minuty plyny v požárním úseku chladly přibližně lineárně, ve 130 minutě požáru poklesla teplota pod 200 °C. Izotermy na obr. 5a ukazují, že při nárůstu teplot se nejvyšší teploty koncentrovaly ve středu požárního úseku, s rozdílem teplot 102 °C v 15 minutě požáru. Nejvyšší teploty byly naměřeny vzadu v požárním úseku, viz obr. 5b, kdy byl ve 45 minutě požáru v přední části úseku rozdíl teplot 194 °C. Při chladnutí se rozdíly teplot zmenšovaly, např. v 95 minutě požáru dosahovaly 105 °C.



Obr. 3 Měření teploty plynu v požárním úseku



Obr. 4 Rozložení teplot plynu v požárním úseku v čase a předpověď parametrickou a nominální teplotní křivkou



Obr. 5 Rozvoj teploty plynu v požárním úseku, a) při zahřívání, b) při nejvyšších teplotách a c) při chladnutí

Předpověď teploty plynů

Předpověď teploty plynů v požárním úseku lze parametrickými teplotními křivkami a dynamickou analýzou plynů s využitím MKP. Nominální teplotní křivky, viz [4], popisují smluvní nárůst teploty pro požární zkoušky. Používají se jako nejjednodušší teplotní křivky. Skutečnou teplotou v požárním úseku nepopisují. Parametrické teplotní křivky jsou založeny na pracích Kawagoe publikovaných v roce 1958 [5], který popsal závislost teploty v požárním úseku na čase pomocí rovnováhy tepla výrazem

$$\dot{q}_C = \dot{q}_L + \dot{q}_W + \dot{q}_R + \dot{q}_B \quad (1)$$

kde \dot{q}_C je vývoj tepla při hoření, \dot{q}_L ztráta tepla radiací otvory, \dot{q}_W ztráta tepla ohraničujícími konstrukcemi, \dot{q}_R ztráta tepla radiací ohraničujícími konstrukcemi a \dot{q}_B teplo akumulované v plynu v požárním úseku.

Předpokládá se, že palivo plně vyhoří uvnitř požárního úseku, teplota plynů bude rovnoměrná, přestup tepla ohraničujícími konstrukcemi je rovnoměrný v čase i prostoru a konstantní. Jednotlivé členy ve vztahu (1) jsou popsány analytickými výrazy, které byly řadou autorů zpřesňovány. Pettersson a kol. [6] zpřesnil závislost podle výsledků řady vlastních experimentů a matematicky upravil pro praktické použití. Navržené řešení vyžaduje numerickou integraci, při ručním výpočtu praxi se odečítá z grafů. V české praxi se parametrické předpovědi využívá v předběžné normě ČSN 73 0804 (*Požární bezpečnost staveb, Výrobní objekty*, ČSN Praha, poslední verze je z roku 2002) od roku 1986, viz [7]. Evropský model je pro českou technickou veřejnost k dispozici v předběžném textu evropské normy [4] publikovaném v roce 1993. Současná verze normy z roku 2004, ČSN EN 1991-1-2 [4] příloha A, je založena na posledních experimentech a zohledňuje hořlavost současných materiálů. Zde uvedené teplotní křivky lze využít pro požární úseky do podlahové plochy 500 m², bez otvorů ve střeše a s maximální výškou požárního úseku 4 m. Závislost teploty v čase je vyjádřena ve tvaru

$$\theta_g = 20 + 1325 (1 - 0,324 e^{-0,2 t^*} - 0,204 e^{-1,7 t^*} - 0,472 e^{-19 t^*}) \quad (2)$$

kde θ_g je teplota plynů v požárním úseku ve °C, $t^* = t \Gamma$ náhradní čas a t čas v hodinách. Vliv otvorů a kvality povrchů se zohledňuje úpravou času součinitelem

$$\Gamma = [O/O_{ref}]^2 / (b/b_{ref})^2 = [O/0,04]^2 / (b/160)^2 = [O/b]^2 / (0,04/160)^2 \quad (3)$$

Koeficient otvorů $O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t$ [m^{1/2}] lze uvažovat v rozsahu $0,02 \leq O \leq 0,20$. Koeficient povrchů

$b = \sqrt{(\rho c \lambda)}$ [J/m²s^{1/2}°K] je možno měnit v rozsahu $100 \leq b \leq 2200$. O_{ref} je referenční koeficient otvorů a referenční koeficient b_{ref} povrchů, který byl stanoven pro požární úsek z lehkého betonu. V analytických výrazech se pro popis konstrukcí ohraničujících požární úsek používá: A_v celková plocha svislých otvorů, h_{eq} vážený průměr výšek oken, A_t celková plocha konstrukcí (stěny, strop a podlaha, včetně otvorů), ρ objemová

hmotnost, c specifické teplo a λ tepelná vodivost. Pro $\Gamma = 1,0$ se křivka do teploty 1300°C blíží nominální teplotní křivce. Sestupná větev grafu se popisuje výrazy

$$\theta_g = \theta_{max} - 625 (t^* - t^*_{max} \cdot x) \quad \text{pro } t^*_{max} \leq 0,5 \quad (4)$$

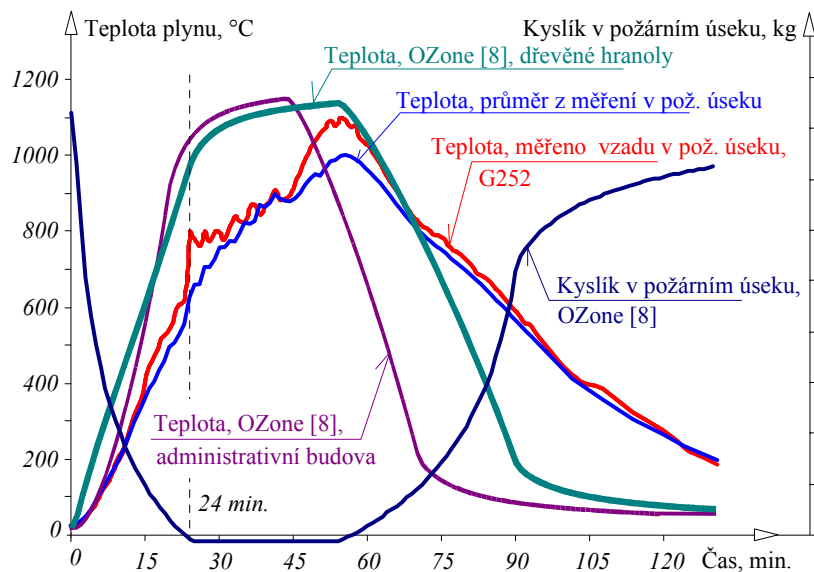
$$\theta_g = \theta_{max} - 250 (3 - t^*_{max}) (t^* - t^*_{max} \cdot x) \quad \text{pro } 0,5 < t^*_{max} < 2 \quad (5)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250 (t^* - t^*_{max} \cdot x) \quad \text{pro } t^*_{max} \geq 2 \quad (6)$$

kde $t^*_{max} = (0,2 \cdot 10^{-3} q_{t,d} / O) \Gamma$ a $x = 1,0$ jestliže $t_{max} > t_{lim}$, nebo $x = t_{lim} \Gamma / t^*_{max}$, jestliže $t_{max} = t_{lim}$. Při malé rychlosti rozvoje požáru je $t_{lim} = 25$ minut, při střední rychlosti $t_{lim} = 20$ minut a při velké rychlosti $t_{lim} = 15$ minut. Nejvyšší teplota θ_{max} ve fázi ohřevu nastává při $t^* = t^*_{max}$. Náhradní čas pro nejvyšší teplotu se stanoví jako $t^*_{max} = t_{max} \Gamma$, kde $t_{max} = \max [(0,2 \cdot 10^{-3} q_{t,d} / O); t_{lim}]$. $q_{t,d} = q_{f,d} A_f / A_t$ je návrhová hodnota hustoty požárního zatížení, vztažená k celé ploše povrchu A_t ohraničujících konstrukcí úseku, přičemž $q_{f,d}$ je návrhová hodnota hustoty požárního zatížení, vztažená k ploše podlahy A_f . Ve výpočtu se odlišné vlastnosti stropu, stěn popřípadě podlahy a vícevrstvé ohraničující konstrukce zohledňují váženými průměry.

Na obr. 3 je zobrazena předpověď rozvoje plynů podle (1) [4] pro zkoušku ČVUT v Praze 16. 1. 2003. Ve výpočtu se uvažovalo s $A_v = 11,43 \text{ m}^2$; $A_t = 298 \text{ m}^2$, $h_{eq} = 1,27 \text{ m}$; $O = 0,04325$, $b = 701,96$; $\Gamma = 3,188878$; $q_{f,d} = 720 \text{ MJ/m}^2$ a $q_{t,d} = 186,04 \text{ MJ/m}^2$. Při náhradním čase $t^* = 2,745 \text{ h}$ byla předpovězena teplota 1078°C v 53 minutě požáru.

Pro požární úseky o velikosti nad 500 m^2 podlahové plochy, s otvory ve střeše a s výškou požárního úseku nad 4 m se používá dynamická analýza plynů spolu s MKP. Na Internetu je k dispozici řada programů vhodných pro praxi. Mezi nejvíce citované patří COMPF2, FASTLite a OZone. Program OZone, viz [8], dělí požární úsek na jednu nebo dvě oblasti s možností přechodu mezi oběma modely. V oblasti se předpokládá rovnoměrné rozložení teploty. Energetická bilance se počítá po krocích s využitím jedenácti proměnných. Přestup teploty do stěn je řešen metodou MKP. Při odhořívání je zohledněn typ požárního zatížení stanovených podle evropských norem, viz [4]. Na obr. 6 je pro požární úsek v Cardingtonu porovnána návrhová křivka, která odpovídá odhořívání dřevěných hranolů, s průběhem teploty naměřeným v požárním úseku. Předpověď programem je konzervativní, v 54 minutě požáru byla spočítána teplota 1146°C . Návrhová křivka vypracovaná pro odhořívání v současné administrativní budově dosahuje obdobných teplot ale hoření je rychlejší. Nejvyšší teplota 1149°C byla předpovězena ve 43 minutě požáru. Na váhové bilanci kyslíku v požárním prostoru (jeden z výstupů programu) je vidět přechod fáze řízené palivem do fáze řízené přívodem kyslíku.



Obr. 6 Porovnání předpovědi programem OZone s naměřenými hodnotami, bilance kyslíku v požárním úseku

Závěrem

Požární zkouška na osmipodlažním objektu potvrdila dobrou kvalitu evropské normové předpovědi teploty v požárním úseku. Parametrické teplotní křivky, které jsou k dispozici pro českou odbornou veřejnost již od roku 1986, jsou v ČSN EN 1991-1-2 zpřesněny. Využitím výpočetní techniky jsou pro praktický návrh konstrukce při požáru snadno přístupné nejen parametrické teplotní křivky ale i aplikace dynamické analýzy plynů s využitím MKP.

Na přesnost předpovědi přestupu tepla do konstrukce a na popis chování konstrukce za vysokých teplot je zaměřeno pokračování tohoto příspěvku.

F. Wald
A. Tichá
www.fsv.cvut.cz/~wald

Oznámení

Autoři děkují za podporu práce grantem Grantové agentury České republiky č. 103/04/2100.

Literatura

- [1] Wald F., Beneš M.: Požární zkoušky v Cardingtonu, *Konstrukce* 1/2004, s. 30-34. ISSN 1213-8762.
- [2] Wald F., Pašek J.: Zkouška konstrukční celistvosti v Cardingtonu, příprava zkoušky, *Konstrukce* 3/2004 v tisku.
- [3] Wald F., Silva S., Moore D.B, Lennon T. (2004), *Structural integrity fire test*, v "Proceedings of Nordic Steel Conference", Copenhagen 2004, s. 577-588.
- [4] ČSN EN 1991-1-2: Zásady navrhování a zatížení konstrukcí, *Zatížení konstrukcí namáhaných požárem*, ČSNI, Praha 2004, s. 54.
- [5] Kawagoe K.: *Fire behaviour in room*, report No.27, Building Research Institute, Japan Ministry of Construction, Tokyo 1958.
- [6] Pettersson O.: *The connection between the real fire exposure and the heating conditions according to standard fire-resistance tests - with special application to steel structures*, Document CECM 3-73/73, ECCS, Brussels 1973.
- [7] Reichel V.: Navrhování požární bezpečnosti výrobních objektů, edice Zabraňujeme škodám, Česká státní pojišťovna, Svazek 17, Praha 1987.
- [8] Jean-Marc Franssen: OZone V2, Université Liege, URL: www.ulg.ac.be/matstruc/Download.html.