

ZAVÁDĚNÍ EN 1992-1-2: „NAVRHOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ – ČÁST 1-2: NAVRHOVÁNÍ NA ÚČINKY POŽÁRU“ DO PRAXE – VÝPOČETNÍ METODA PRO OVĚŘENÍ SMYKOVÉ ÚNOSNOSTI ■ INTRODUCTION OF EN 1992-1-2: “DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES – PART 1-2: FIRE DESIGN” TO PRACTICE – SIMPLIFIED CALCULATION METHOD FOR ASSESSMENT OF SHEAR RESISTANCE

Jaroslav Procházka, Josef Sura, Radek Štefan

Príspevek je venovaný problematice navrhovania betonových konštrukcií na účinky požáru podľa normy ČSN EN 1992-1-2 [4]. Popisuje výpočetnú metódu pre overenie smykovej únosnosti. Príspevek navazuje na články uverejnené v predchádzajúcich číslach časopisu [5 až 8]. ■ This paper is devoted to fire design of concrete structures according to ČSN EN 1992-1-2 [4]. The simplified calculation method for assessment of shear resistance under fire conditions is described. The paper follows the articles printed in previous issues of this journal [5-8].

Pro ověření požární odolnosti železobetonových konstrukčních prvků lze podle normy ČSN EN 1992-1-2 [4] použít tabulkové hodnoty, zjednodušené výpočetní metody a zpřesněné výpočetní metody. Postup stanovení požární odolnosti s využitím tabulkových hodnot byl popsán v článku [6]. Příspěvek [7] byl zaměřen na vybrané zjednodušené metody výpočtu – metodu izotermie 500 °C a zónovou metodu. Článek [8] byl věnován zjednodušené metodě pro nosníky a desky, uvedené v příloze E normy ČSN EN 1992-1-2 [4].

Tento příspěvek je zaměřen na zjednodušenou výpočetní metodu pro ověření smykové únosnosti, která je uvedena v příloze D normy ČSN EN 1992-1-2 [4]. Podle této normy je smykové porušení v důsledku požáru velmi neobvyklé, pokud je konstrukce navržena podle základní normy ČSN EN 1992-1-1 [3]. Dle obecných pravidel lze únosnost ve smyku při požáru stanovit metodami uvedenými v ČSN EN 1992-1-1 [3] při uvážení redukovaných materiálových vlastností, redukovaného průřezu a redukovaného předpětí ve všech částech průřezu vystaveného účinkům požáru. Jedná se tedy o metody používané pro stanovení smykové únosnosti za běžné teploty s přihlédnutím k vlivu zvýšených teplot při požáru. Pro výpočet smykové únosnosti konstrukčního prvku při požáru lze použít pravidla uvedená v kap. 4.2 normy ČSN EN 1992-1-2 [4].

Při posuzování požární odolnosti je nutné stanovit teplotní profil příčného řezu řešeného konstrukčního prvku vystaveného účinkům požáru. Teplotní profil může být obvykle stanoven bez uvažování výztužných ocelových pru-

tů, kterým se přiřadí teplota betonu v místě těžiště ocelového profilu. Tento předpoklad je přijatelný pro podélnou výztuž, ale není zcela přesný pro třmínky (obr. 1). Třmínky na rozdíl od podélné výztuže procházejí v příčném řezu řešeného prvku oblastmi s různými teplotami (obecně jsou rohy třmínků a spodní exponovaný povrch teplejší než horní část). Ve skutečnosti nastává maximální namáhání třmínku v blízkosti trhliny, která vznikla vlivem smyku. Tato trhlina navíc obvykle protíná jednotlivé třmínky v různých úrovních (obr. 1). Z tohoto důvodu je nezbytné jednoznačně definovat referenční teplotu získanou v rozhodujícím místě průřezu. Na základě této referenční teploty se stanoví redukovaná pevnost oceli třmínků a posouzení únosnosti ve smyku se provede níže popsaným postupem.

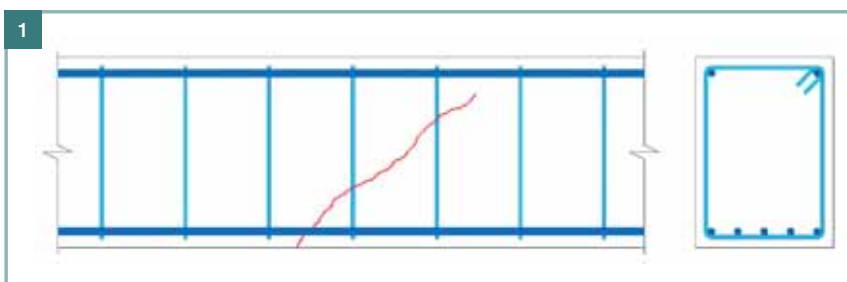
V případě, že smyková únosnost závisí hlavně na tahové pevnosti betonu (platí pro prvky bez smykové výztuže nebo prvky s konstrukční smykovou výztuží), je nutné uvážit tahovou pevnost betonu za požáru. Pro redukci tahové pevnosti betonu lze použít hodnoty redukčního součinitele $k_{ct}(\theta)$ podle obr. 2. Zvláštní pozornost má být věnována místům, kde jsou tahová napětí způsobena nelineárním rozložením teploty (např. desky s dutinami, široké nosníky atd.). Redukce pevnosti ve smyku se pak má uvážit podle zvýšených tahových namáhání.

POSTUP PRO POSOUZENÍ ÚNOSNOSTI ŽELEZOBETONOVÉHO PRŮŘEZU VE SMYKU ZA POŽÁRU

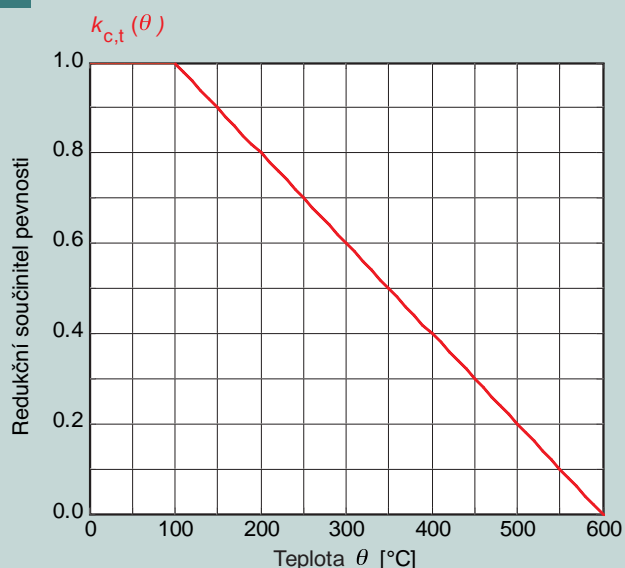
- 1) Na základě zjednodušených metod (metoda izotermie 500 °C a zónová metoda, viz [7]) se stanoví rozměry redukovaného průřezu.
- 2) V závislosti na použité metodě výpočtu se určí pevnost betonu v tlaku za požáru. Při použití metody izotermie 500 °C se uvažuje pevnost $f_{cd,fi} = f_{cd,fi}(20) = f_{ck}/\gamma_{C,fi}$ uvnitř izotermie 500 °C. Při použití zónové metody se uvažuje redukovaná pevnost $f_{cd,fi} = k_c(\theta) f_{ck}/\gamma_{C,fi}$ viz [7]. Hodnoty redukčního součinitele $k_c(\theta)$ se stanoví podle obr. 3.
- 3) V závislosti na použité metodě výpočtu se určí pevnost betonu v tahu za požáru. Při použití metody izotermie 500 °C se uvažuje uvnitř izotermie pevnost $f_{ctd,fi} = f_{ctd,fi}(20)$

Obr. 1 Smyková trhlina protínající třmínky v různých úrovních (podle [4], obr. D.1)

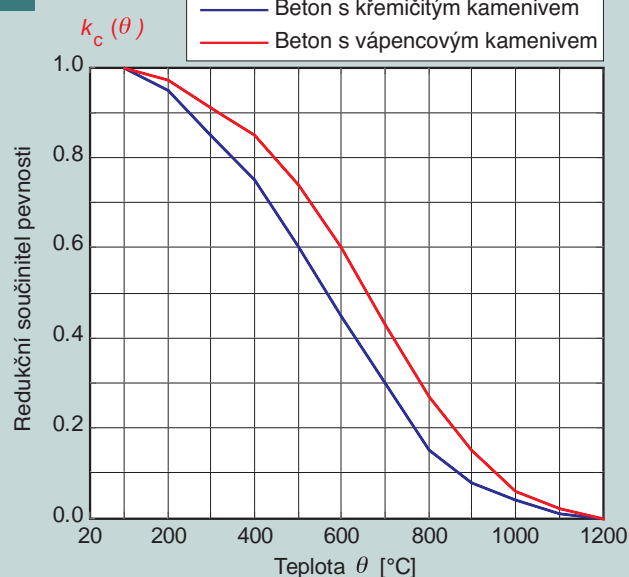
■ Fig. 1 Shear crack intersect links at various levels (source [4], Fig. D.1)



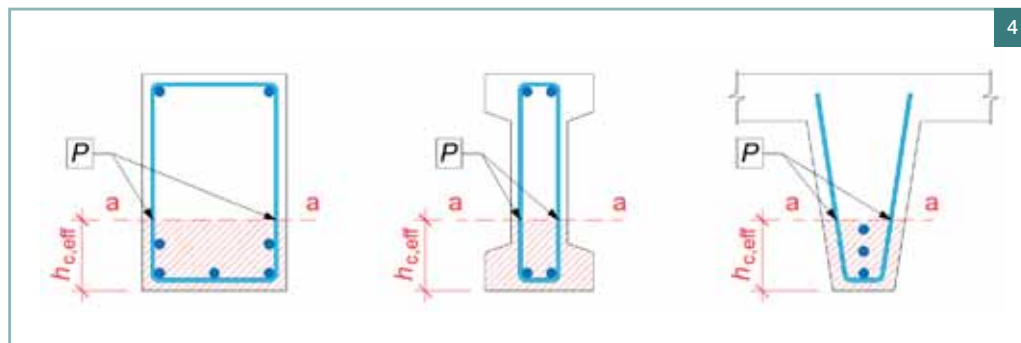
2



3



4



$= f_{ctk}/\gamma_{C,fi}$. Při použití zónové metody se uvažuje redukovávaná pevnost $f_{ctd,fi} = k_{ct}(\theta) f_{ctk}/\gamma_{C,fi}$ viz [7]. Hodnoty redukčního součinitele $k_{ct}(\theta)$ se stanoví z obr. 2.

- 4) Dále následuje stanovení účinné tahové oblasti (viz ČSN EN 1992-1-1 [3], část 7) o výšce $h_{c,eff}$. Tato oblast je shora omezena řezem a-a (obr. 4).
- 5) Jako referenční teplota třmínků θ_p se uvažuje teplota v bodě P (průsečík řezu a-a s třmínkem) viz obr. 4. Teploty je možné stanovit pomocí teplotních profilů uvedených v příloze A normy ČSN EN 1992-1-2 [4], případně s využitím výpočetních programů (např. program Temp-Analysis [9]).
- 6) Následně se stanoví návrhová hodnota pevnosti oceli třmínků za požáru v závislosti na referenční teplotě: $f_{ywd,fi} = k_s(\theta_p) f_{ywk}/\gamma_{s,fi}$. Hodnoty redukčního součinitele $k_s(\theta_p)$ se stanoví podle obr. 5.
- 7) Pro výpočet smykové únosnosti se použijí metody uvedené v normě ČSN EN 1992-1-1 [3] (tzn. metody používané pro návrh za běžné teploty) při uvážení příslušných redukci materiálů a průřezu, viz výše.

PŘÍKLAD

Úkolem je posoudit, zda železobetonový trám o rozměrech 200 x 400 mm na rozpětí $l = 5,6$ m splňuje z hlediska smykové únosnosti požadovanou požární odolnost R60. Trám je zatížen rovnoměrným spojitým zatížením $g_k = 3$ kN/m (včetně vlastní tíhy) a osamělými břemeny $F = 90$ kN symetricky umístěnými ve vzdálenosti 1 m od podpor (obr. 6). Použité materiály: beton C30/37, ocel B 500B.

Při návrhu za běžné teploty bylo navrženo vyztužení trá-

mu 3 $\varnothing 18$ mm, profil třmínků $\varnothing_{sw} = 8$ mm, osová vzdálenost třmínků $s = 200$ mm. Krytí třmínků bylo stanoveno $c = 20$ mm od spodního povrchu a $c_{sd} = 25$ mm od bočního líce železobetonového trámu. Takto navržený trám za běžné teploty vyhoví ($M_{Rd} = 106,7$ kNm $>$ $M_{Ed} = 101,8$ kNm, $V_{Rd} = 105,4$ kNm $>$ $V_{Ed} = 98,4$ kNm).

Posouzení únosnosti železobetonového prvku ve smyku za požáru

- 1) Rozměry redukovaného průřezu stanovíme pomocí metody izotermie 500 °C (určíme průběh izotermie 500 °C v betonovém průřezu a plochu uvnitř izotermie nahradíme obdélníkem; tím získáme idealizovaný redukovaný průřez, viz obr. 7). Rozměry idealizovaného redukovaného průřezu jsou: $b_{fi} = 154$ mm, $d_{fi} = d = 363$ mm, $h_{fi} = 365$ mm.
- 2) Pevnost betonu v tlaku se při užití metody izotermie 500 °C uvažuje uvnitř izotermie 500 °C jako

$$f_{cd,fi} = f_{cd,fi}(20^\circ\text{C}) = \frac{f_{ck}}{\gamma_{C,fi}} = \frac{30}{1} = 30 \text{ [MPa]}.$$

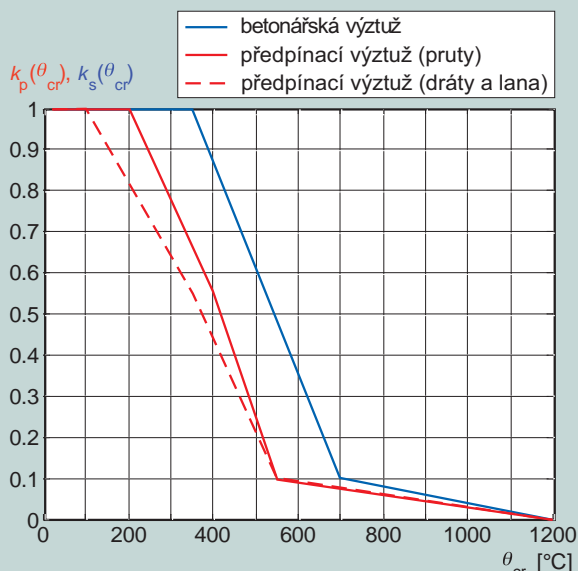
- 3) Pevnost betonu v tahu se určí stejným způsobem

$$f_{ctd,fi} = f_{ctd,fi}(20^\circ\text{C}) = \frac{f_{ctk}}{\gamma_{C,fi}} = \frac{2}{1} = 2 \text{ [MPa]}.$$

- 4) Řez a-a se nachází ve vzdálenosti $h_{c,eff}$ od taženého okraje řešeného průřezu. Vzdálenost $h_{c,eff}$ se určí jako

$$h_{c,eff} = \min \left\{ 2,5(h-d); \frac{h-x}{3}; \frac{h}{2} \right\}.$$

5



Obr. 2 Součinitel $k_{c,t}(\theta)$ pro redukci pevnosti betonu v tahu f_{ctk} při vysokých teplotách (podle [4], obr. 3.2) ■ Fig. 2 Reduction factor $k_{c,t}(\theta)$ for concrete strength in tension f_{ctk} at high temperatures (source [4], Fig. 3.2)

Obr. 3 Součinitel $k_c(\theta)$ pro redukci pevnosti betonu v tlaku f_{ck} při vysokých teplotách (podle [4], obr. 4.1) ■ Fig. 3 Reduction factor $k_c(\theta)$ for concrete strength in compressive f_{ck} at high temperatures (source [4], Fig. 4.1)

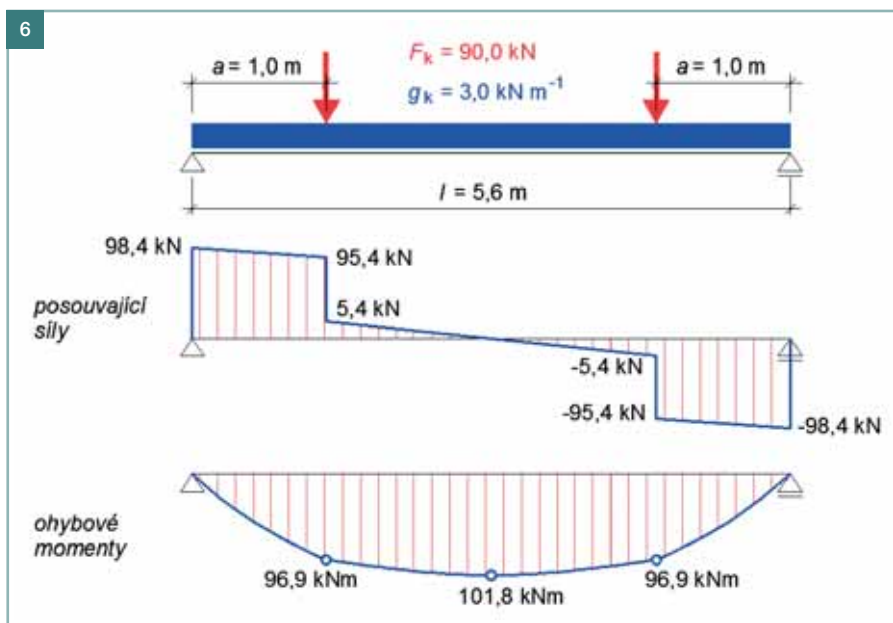
Obr. 4 Poloha bodu P pro stanovení referenční teploty θ_p (podle [4], obr. D.2) ■ Fig. 4 Position of P-point for evaluation of the reference temperature θ_p (source [4], Fig. D.2)

Obr. 5 Referenční křivky pro kritickou teplotu θ_{cr} betonářské a předpínací výztuže odpovídající redukčnímu součiniteli $k_s(\theta_{cr}) = \sigma_{s,fr}/f_{yk}(20^\circ\text{C})$ nebo $k_p(\theta_{cr}) = \sigma_{p,fr}/f_{pk}(20^\circ\text{C})$ (zdroj [4], obr. 5.1) ■ Fig. 5 Reference curves for critical temperature θ_{cr} of reinforcing and prestressing steel corresponding to the reduction factor $k_s(\theta_{cr}) = \sigma_{s,fr}/f_{yk}(20^\circ\text{C})$ or $k_p(\theta_{cr}) = \sigma_{p,fr}/f_{pk}(20^\circ\text{C})$ (source [4], Fig. 5.1)

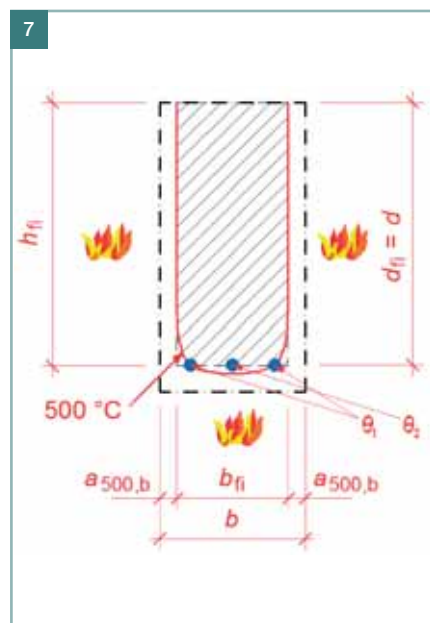
Obr. 6 Statické schéma řešeného železobetonového trámu ■ Fig. 6 Scheme of the analyzed reinforced concrete beam

Obr. 7 Stanovení rozměrů redukovaného průřezu metodou izotermy 500°C ■ Fig. 7 Determination of the dimensions of reduced cross-section using 500°C isotherm method

6



7



$$h_{c,eff} = \min \left\{ 2,5(0,4 - 0,363); \frac{0,4 - 0,109}{3}; \frac{0,4}{2} \right\} = \min \{ 0,0925; 0,097; 0,2 \} = 0,0925 \text{ [m]}$$

(výpočet $h_{c,eff}$ viz norma ČSN EN 1992-1-1 [3] kap. 7.3.2).

5) Referenční teplota třmínků θ_p se uvažuje v bodě P (ten-to bod je definován jako průsečík řezu a-a s třmínkem). Teplotní profil celého průřezu je uveden na obr. 8. Teplota v bodě P je

$$\theta_p = 430^\circ\text{C}.$$

6) Návrhová hodnota pevnosti oceli třmínků při požáru se stanoví jako

$$f_{ywd,fi} = k_s(\theta) f_{ywd}(20^\circ\text{C}) = k_s(\theta) \frac{f_{ywk}}{\gamma_{s,fi}} = 0,86 \frac{500}{1} = 430 \text{ [MPa]}.$$

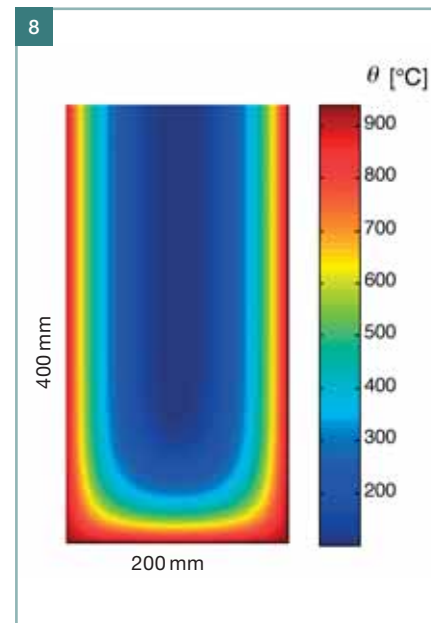
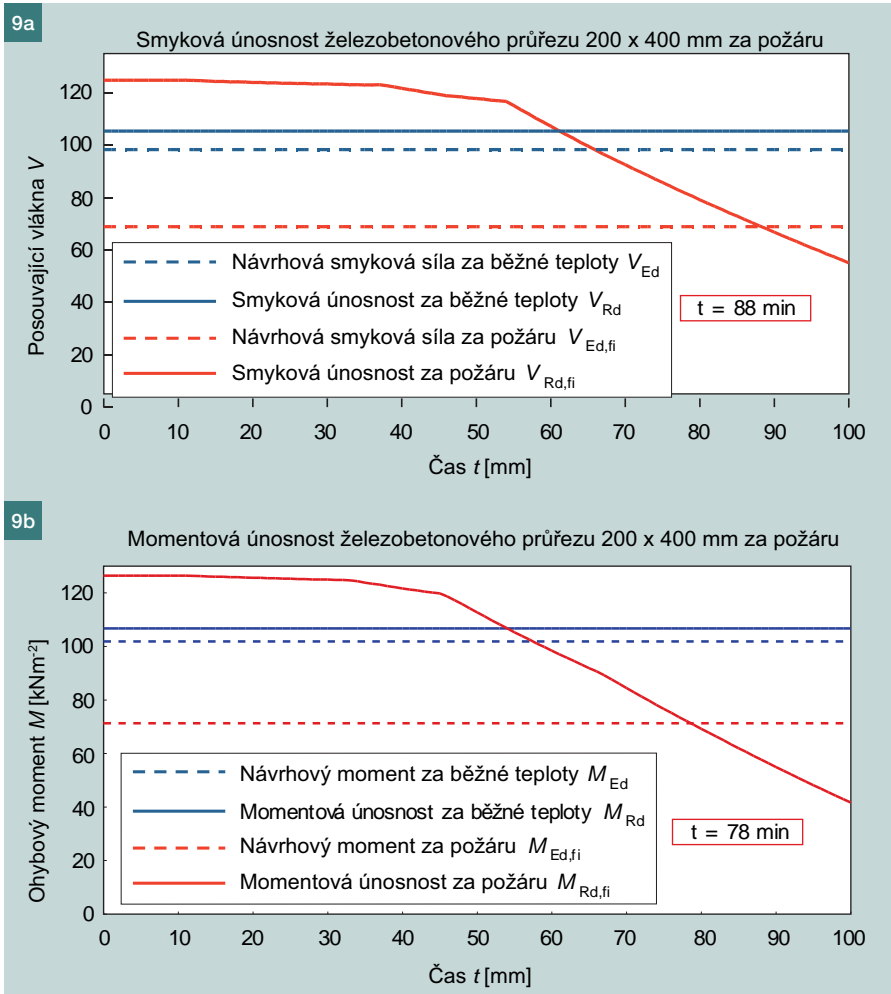
7) Smyková únosnost pro řešený trám v čase 60 min se určí ze vzorce

$$V_{Rd,fi} = \frac{A_{sw} f_{ywd,fi} z_{fi} \cot \omega}{s}$$

kde A_{sw} je navržená plocha třmínků,

$A_{sw} = \frac{\pi d^2}{4} n$ (n - střížnost třmínků), $f_{ywd,fi}$ redukovaná návrhová pevnost oceli třmínků, z_{fi} rameno vnitřních sil (stanoveno při výpočtu ohybové únosnosti za požáru), ω úhel sklonu tlakových diagonál (dle [3] je obvyklé značení θ , zde je použit symbol ω z toho důvodu, aby nedošlo k záměně se značením teplot), s osová vzdálenost třmínků.

Pro výpočet smykové únosnosti je nutné znát rameno vnitřních sil za požáru z_{fi} , které se stanovuje při posouzení ohybové únosnosti. Při stanovení ohybové únosnosti řešeného trámu se nejprve určí teploty v jednotlivých výztužných prutech a rozměry redukovaného průřezu. Rozměry redukovaného průřezu jsou $b_{fi} = 154 \text{ mm}$, $d_{fi} = d = 363 \text{ mm}$,

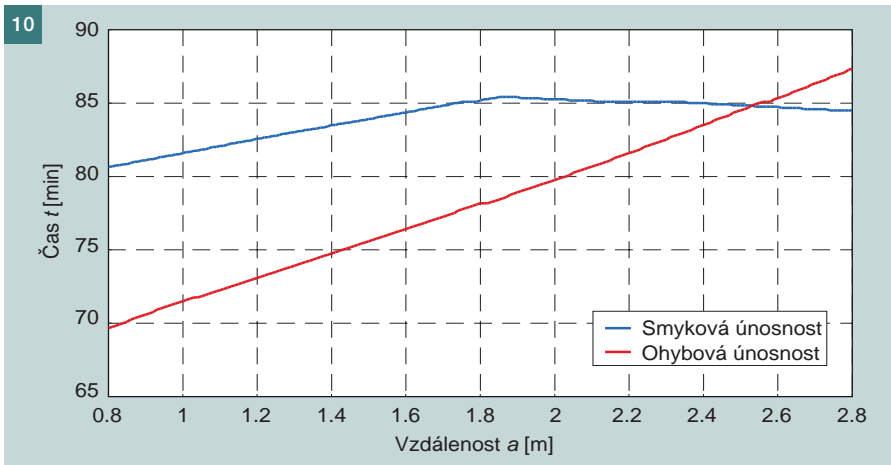


Obr. 8 Teplotní profil betonového průřezu 200 x 400 mm² v čase 60 min při vystavení normovému požáru (stanoveno pomocí programu TempAnalysis [9]) ■

Fig. 8 Temperature profile of concrete cross-section 200 x 400 mm² for standard fire exposure of 60 minutes (determined using TempAnalysis [9] software)

Obr. 9 Porovnání smykové a ohybové únosnosti za požáru ■ Fig. 9 Comparison of shear and bending resistance under fire conditions

Obr. 10 Porovnání smykové a ohybové únosnosti za požáru pro měnící se vzdálenost osamělého břemene od podpory ■ Fig. 10 Comparison of shear and bending resistance under fire conditions for different positions of point loads



$h_{fi} = 365 \text{ mm}$ a teploty $\theta_1 = 494 \text{ °C}$, $\theta_2 = 366 \text{ °C}$ (obr. 7). V závislosti na teplotách v těžištích jednotlivých výztužných prutů odečteme z obr. 5 hodnoty součinitele pro redukci pevnosti oceli

$$k_{sy,1} = 0,68,$$

$$k_{sy,2} = 0,96.$$

Dále stanovíme střední hodnotu součinitele pro redukci pevnosti oceli a příslušnou redukovanou pevnost

$$k_{sm} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{sy,i}}{n} = \frac{0,68 \cdot 2 + 0,96 \cdot 1}{3} = 0,78,$$

$$f_{yd,fi,m} = k_{sm} f_{yk} = 0,78 \cdot 500 = 388,9 \text{ [MPa]}.$$

Další posouzení probíhá stejným způsobem jako za běžné teploty, ovšem s uvážením redukovaného průřezu a redukované pevnosti oceli.

Výška tlačené oblasti:

$$x_{fi} = \frac{A_{s,prov} f_{yd,fi,m}}{0,8 b_{fi} f_{cd,fi}} = \frac{763 \cdot 388,9}{0,8 \cdot 154 \cdot 30} = 79 \text{ [mm]},$$

rameno vnitřních sil:

$$z_{fi} = d_{fi} - 0,4 x_{fi} = 363 - 0,4 \cdot 79 = 332 \text{ [mm]},$$

momentová únosnost za požáru:

$$M_{Rd,fi} = A_{s,prov} f_{yd,fi,m} z_{fi} = 763 \cdot 388,9 \cdot 332 = 98,42 \cdot 10^6 \text{ [Nmm]} = 98,42 \text{ [kNm]} .$$

Účinky zatížení při požární situaci lze podle normy ČSN EN 1992-1-2 uvažovat jako

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d ,$$

kde η_{fi} je redukční součinitel pro úroveň návrhového zatížení při požární situaci (konzervativně $\eta_{fi} = 0,7$), E_d účinky zatížení při běžné teplotě.

Posouzení momentové únosnosti:

$$M_{Rd,fi} = 98,42 \text{ kNm} > M_{Ed,fi} = \eta_{fi} M_{Ed} = 0,7 \cdot 101,8 = 71,26 \text{ [kNm]} .$$

Navržený prvek z hlediska ohybové únosnosti pro požadovanou požární odolnost R60 vyhoví.

Výpočet smykové únosnosti

$$V_{Rd,fi} = \frac{100,5 \cdot 430 \cdot 332 \cdot 1,5}{200} = 107\,300 \text{ [N]} = 107,3 \text{ [kN]} .$$

Na závěr provedeme posouzení smykové únosnosti za požáru v čase 60 min.

$$V_{Rd,fi} = 107,3 \text{ kN} > V_{Ed,fi} = \eta_{fi} V_{Ed} = 0,7 \cdot 98,4 = 68,88 \text{ [kN]} .$$

Navržený prvek z hlediska smykové únosnosti pro požadovanou požární odolnost R60 vyhoví.

Na obr. 9 je zpracováno porovnání smykové a ohybové únosnosti řešeného trámu za požáru v závislosti na čase. Na obr. 9a je plnou čarou vykreslena smyková únosnost za běžné teploty (modrá čára), resp. za požáru (červená čára). Čárkovanou čarou jsou vykresleny účinky zatížení. Z výsledků je patrné, že k vyčerpání smykové únosnosti při požáru dojde v čase $t = 88$ min.

Na obr. 9b je pro porovnání zobrazena ohybová únosnost řešeného trámu za požáru. Plnou čarou jsou opět vykresleny únosnosti za běžné teploty (modrá čára), resp. za požáru (červená čára) a čárkovanými čarami jsou zobrazeny účinky zatížení. Z průběhu momentové únosnosti za požáru je zřejmé, že k vyčerpání únosnosti dojde v čase $t = 78$ min.

Z porovnání obrázků 9a a 9b je zřejmé, že v tomto případě dojde za požáru dříve ke ztrátě ohybové únosnosti a až později by byla vyčerpána smyková únosnost. Tento závěr potvrzuje předpoklad normy ČSN EN 1992-1-2, podle které je porušení smykem za požáru neobvyklé, avšak, jak bude ukázáno dále, za jistých podmínek k němu může dojít.

Nyní porovnáme smykovou a ohybovou únosnost za požáru pro měnící se vzdálenost osamělého břemene od podpory. Výchozí zatěžovací schéma je uvedeno na obr. 6. V tomto případě však budeme uvažovat vzdálenost osamělých břemen od podpory v hodnotách od 0,8 m až do poloviny rozpětí (tzn. 2,8 m) a hodnoty osamělých břemen $F = 60$ kN. Na obr. 10 je graf závislosti časů kolapsu v důsledku vyčerpání ohybové, resp. smykové únosnosti na měnící se vzdálenosti osamělých břemen od podpory.

Při návrhu za běžné teploty byla v jednotlivých případech navržena ohybová a smyková výztuž tak, aby byl prvek plně využit. Profil tržníků ($\varnothing_{sw} = 8$ mm) a počet prutů ohybo-

Literatura:

- [1] ČSN EN 1990. Zásady navrhování konstrukcí. Praha: ČNI, 2004
- [2] ČSN EN 1991-1-2. Zatížení konstrukcí – Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. Praha: ČNI, 2004
- [3] ČSN EN 1992-1-1. Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Praha: ČNI, 2006
- [4] ČSN EN 1992-1-2. Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha: ČNI, 2006
- [5] Procházka J.: Zavádění EN 1992-1-2: „Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Navrhování na účinky požáru“ do praxe – Úvod, materiálové charakteristiky. Beton TKS, červen 2005, roč. 5, č. 3, s. 49–54. ISSN 1213-3116
- [6] Procházka J.: Zavádění EN 1992-1-2: „Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Navrhování na účinky požáru“ do praxe – Ověření požární odolnosti pomocí tabulkových hodnot. Beton TKS, říjen 2005, roč. 5, č. 5, s. 54–62. ISSN 1213-3116
- [7] Procházka J., Tožičková L.: Zavádění EN 1992-1-2: „Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Navrhování na účinky požáru“ do praxe – Zjednodušené metody navrhování. Beton TKS, únor 2006, roč. 6, č. 1, s. 49–53. ISSN 1213-3116
- [8] Procházka J., Štefan R.: Zavádění EN 1992-1-2: „Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Navrhování na účinky požáru“ do praxe – Zjednodušená výpočetní metoda pro nosníky a desky. Beton TKS, říjen 2010, roč. 10, č. 5, s. 80–83. ISSN 1213-3116.
- [9] Štefan R., Procházka J.: TempAnalysis – Výpočetní program pro teplotní analýzu průřezů vystavených účinkům požáru [software online]. Praha: ČVUT, 2009. URL <<http://concrete.fsv.cvut.cz/~stefan/vyzkum.htm>>

vé výztuže byl ve všech případech shodný (3), ostatní parametry (vzdálenost tržníků a profil ohybové výztuže) byly do počítány s ohledem na požadavek plného využití.

Dále byla posuzována ohybová a smyková únosnost za požáru dle výše uvedeného postupu a byly stanoveny průběhy závislostí časů kolapsu na vzdálenosti a osamělého břemene od podpory (obr. 10).

Z průběhů závislostí je zřejmé, že čas kolapsu v důsledku porušení smykem za požáru není pro všechny případy zatěžovacích stavů vyšší než čas kolapsu v důsledku vyčerpání ohybové únosnosti. To znamená, že může nastat takový případ, pro který dojde při požáru dříve k porušení smykem než ohybem.

Z toho vyplývá, že v některých případech je nutné provést posouzení smykové únosnosti při požáru, k čemuž lze využít metodu popsanou v tomto článku.

Tento příspěvek byl vypracován za podpory poskytnuté Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky v rámci výzkumného záměru MSM 6840770001.

Prof. Ing. Jaroslav Procházka, CSc.
e-mail: jaroslav.prochazka@fsv.cvut.cz



Ing. Josef Sura
e-mail: josef.sura@fsv.cvut.cz



Ing. Radek Štefan
e-mail: radek.stefan@fsv.cvut.cz

všichni: Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra betonových a zděných konstrukcí
Tháškova 7, 166 29 Praha 6
tel.: 224 354 633