

# Předpověď teploty ve styčnicku čelní deskou za požáru

Wald F., Tichá A.

Cílem projektu je popsat chování materiálu a konstrukce za extrémních teplot. Dílčím cílem je zkouškami a MKP modelováním za vysokých teplot upřesnit popis chování současně vyráběného materiálu, připravit věrnější model prvků a zkouškami na objektech a vyhodnocením chování při požárech zpřesnit předpověď chování konstrukce.

## 1. Úvod

Modelování styčnicků ocelových konstrukcí za vysokých teplot je založeno na postupech za běžných teplot. Při výpočtu se uvažuje s mechanickým a teplotním zatížením za požáru, změnou mechanických vlastností konstrukčních prvků a spojovacích prostředků a možnými rozdíly teplot jednotlivých komponent styčnicku. Při požáru se ve styčnicích působí síly od rozměrových změn při zahřívání konstrukce a při jejím chladnutí. Při návrhu požární odolnosti se postupně řeší rozvoj teploty plynů v požárním úseku, přestup a rozvoj tepla a mechanická odezva styčnicku na zatížení. Modelování za vysokých teplot je založeno na řadě experimentů se styčnicí, viz (Wang, 2002), a na omezeném množství zkoušek na skutečných objektech, viz (Wald, 2005). Mechanické chování za zvýšené teploty lze stanovit metodou komponent, viz (Simões da Silva a kol., 2001). Přestup tepla do konstrukce lze předpovědět pomocí MKP modelů, přírůstkových metod a přímých přibližných řešení. Pro praktické řešení požárně chráněných i nechráněných konstrukcí se nejvíce osvědčily přírůstkové metody, které vycházejí z rovnováhy mezi přiváděným teplem na povrchu a nárůstem teploty  $\Delta\theta_{a,t}$  v objemu prvku v časovém intervalu  $\Delta t$ . Pro nechráněné prvky se řešení popisuje ve tvaru

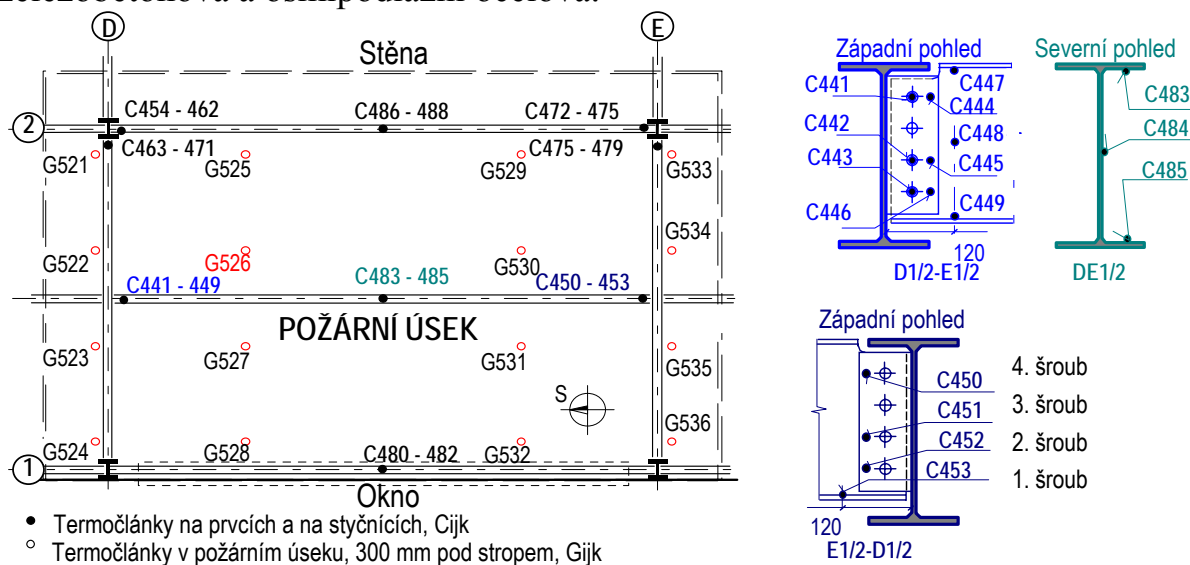
$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m / V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad (1)$$

kde  $k_{sh}$  je korekce vlivem zastínění,  $A_m / V$  součinitel průřezu pro nechráněný průřez,  $A_m$  plocha povrchu prvku jednotkové délky,  $V$  objem prvku jednotkové délky,  $c_a$  měrné teplo materiálu prvku,  $\dot{h}_{net,d}$  je návrhová hodnota složky tepelného toku na jednotku plochy a  $\rho_a$  hustota oceli.

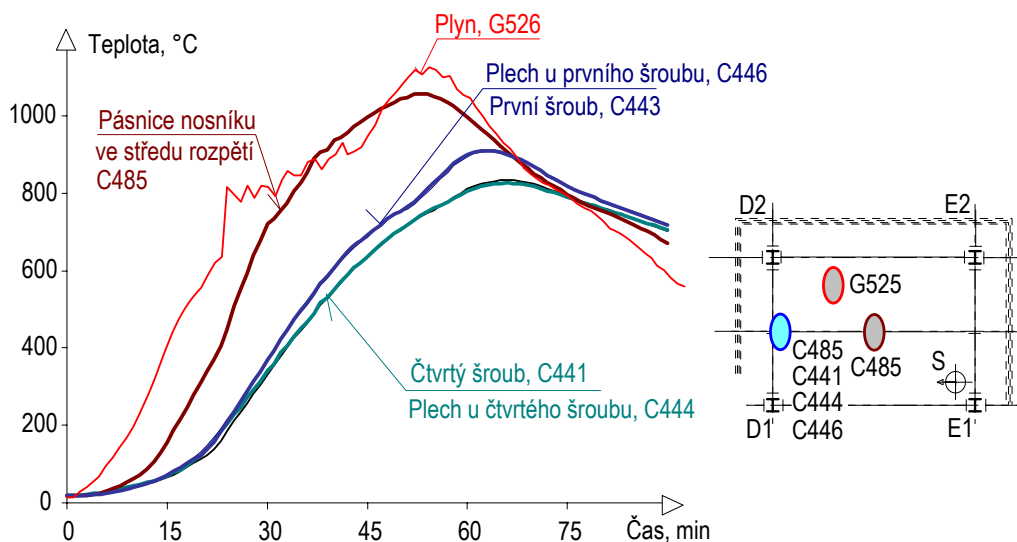
## 2. Teplota ve styčnicku při požáru na zkušebním objektu

V laboratoři na zkoušky velkých rozměrů LBTF (Large Scale Building Test Facility) v Cardingtonu; viz (Wald a kol., 2004), bylo uskutečněno sedm

požárních zkoušek na celém objektu. Cílem sedmé zkoušky pod vedením pracovníků z ČVUT v Praze bylo získat údaje o rozložení teplot na konstrukci, vnitřních silách ve styčnicích a chování ocelobetonové desky. Laboratoř v Cardingtonu je světově unikátní prostor využívaný na zkoušení celých budov. V hale po vzducholodích o vnitřních rozměrech 48 m x 65 m x 250 m jsou postaveny tři experimentální budovy, šestipodlažní dřevěná, sedmipodlažní železobetonová a osmipodlažní ocelová.



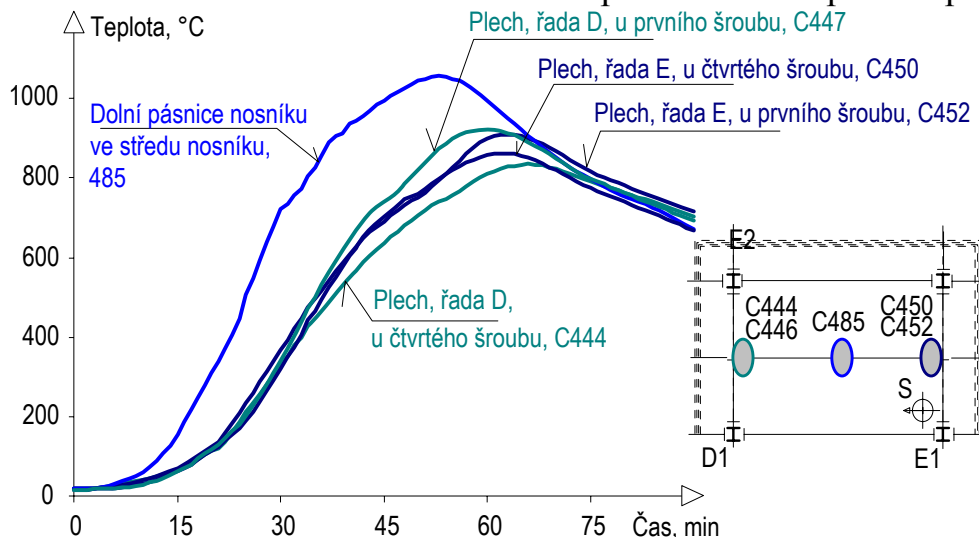
Obr. 1. Poloha termočlánků pod stropem požárního úseku a na ocelové konstrukci



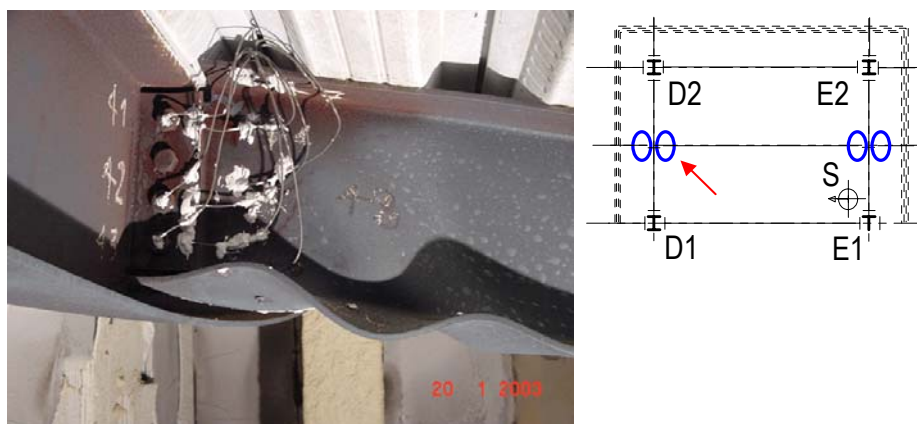
Obr. 2. Teplota ve šroubech a na plechu připoje deskou na stojině nosníku D1/2-E1/2

Ocelobetonový zkušební objekt byl postaven v roce 1993. Jedná se o ocelový

skelet se stropy tvořené celobetonovou deskou, viz (Bravery, 1993). Objekt má osm podlaží (33 m), pět polí na délku ( $5 \times 9 \text{ m} = 45 \text{ m}$ ) a tři na šířku ( $6 + 9 + 6 = 21 \text{ m}$ ) půdorysu. Konstrukce je ztužena ve schodištích a ve štítech příhradovými ztužidly. Nosná konstrukce byla navržena s kloubovými přípoji krátkou čelní deskou mezi nosníky a sloupy/průvlaky a deskou na stojině mezi nosníky a průvlaky. Návrh byl posouzen na zatížení odpovídající administrativní budově v oblasti Bedfordu s uvažováním britské a evropské návrhové praxe a předpisů.



Obr. 3 Teplota čelní desky přípojů deskou na stojině D1/2-E1/2 a E1/2-D1/2.



Obr. 4 Umístění termočlánků a prodloužení otvorů ve styčníku nosníku s průvlakem deskou na stojině

Ve styčnicích byly měřeny teploty šroubů, styčnickových plechů (desky na stojině a čelní desky) a připojovaného nosníku, viz obr. 1. Teploty na styčnickovém plechu přípoje deskou na stojině D1/2-E1/2 jsou shrnuty v tab. 1 a na obr. 2 ukázány pro první (nejnižší) a čtvrtou (nejvyšší) řadu šroubů. Na obr. 3 jsou porovnány teploty změřené na přípojích D1/2-E1/2 a E1/2-D1/2. Na obr. 4 je vidět umístění termočlánků a prodloužení otvorů ve styčníku nosníku s průvlakem deskou na stojině. V horní řadě šroubů se otvor v přípoji D1/2-E1/2 protáhl o +12 mm a v dolní řadě o -10 mm (kladně značeno ve směru od

Prof. ing. František Wald CSc.; ing. Alena Tichá

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Thákurova 7, 166 29 Praha 6 - Dejvice

tel.: + 420 224 354 757; fax.: + 420 233 337 466; e-mail: wald@fsv.cvut.cz

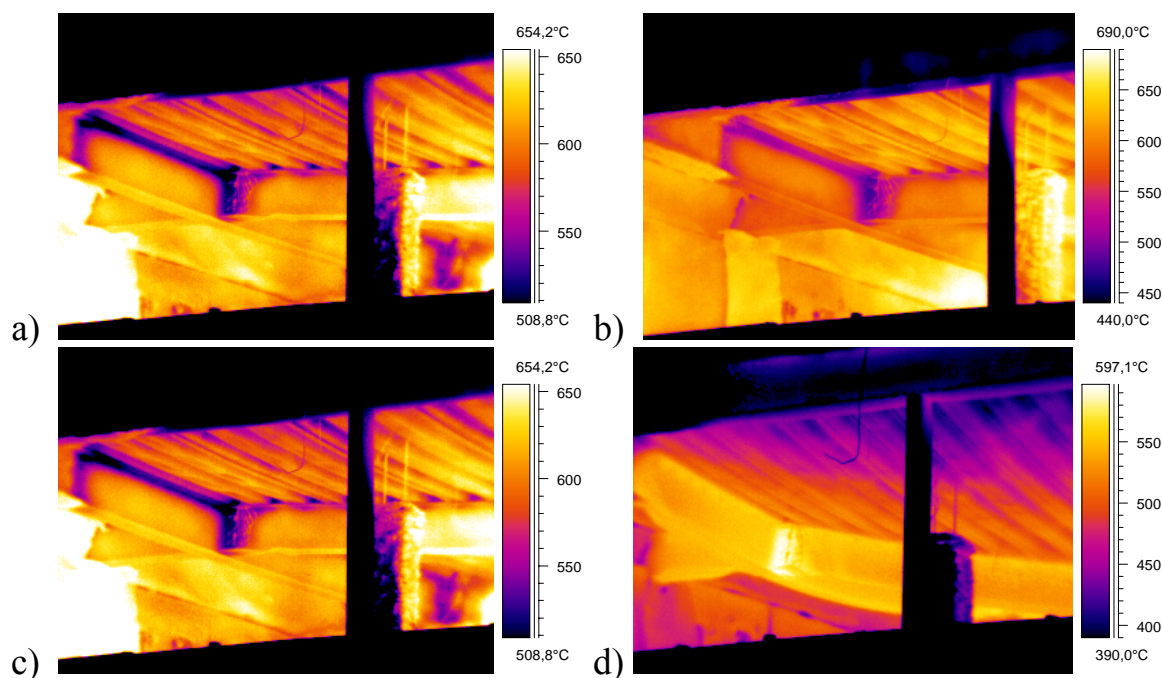
průvlaku). Deformovala se převážně stojina nosníku (tloušťky 6 mm), zatímco styčnickový plech (tloušťky 10 mm) zůstal prakticky nepřetvořen. Deformace umožnily natočení nosníku a jeho působení jako tažené vlákno.

Teplota nosníku je při zahřívání konstrukce vyšší než teploty přípoje. Při chladnutí konstrukce jsou styčníky teplejší, protože je nosník výrazněji ochlazován a jeho teplota klesá rychleji. Rozdíl teplot při nejvyšší teplotě nosníku dosáhl asi 200°C. Rozdíly jsou ozřejměny záběry z termokamer, viz obr. 5 (Wald et al., 2005). Záznam teplot je převeden do stupnice šedé, kde světlejší barvy značí teplejší místa, viz obr. 5. Pro zvýraznění odstínů jsou pro jednotlivé obrázky zvoleny různé stupnice. Termokamera ve vzdálenosti asi 15 m od styčnicku má rozlišení asi 5 mm. Kvalita zobrazení je dostatečná na zachycení lokálního boulení tlačené pásnice nosníku ve 32 min experimentu.

Tab. 1 Teplota (°C) měřená na styčnicku čelní deskou při požáru, značení termočlánků viz obr. 1 (Wald a kol., 2003)

Termočlánek Čas, min	C441	C442	C443	C444	C446	C447	C448
15 min	68,5	66,4	70,2	65,6	70,5	98,2	85,9
30	343,0	350,1	367,6	331,1	368,8	424,5	425,5
45	636,3	671,5	686,9	635,8	691,6	671,2	726,5
60	805,3	862,9	894,5	810,3	899,1	848,6	912,9
Max.	825,6	881,4	907,2	834,3	908,3	859,1	913,8
75	789,1	810,8	817,4	792,9	816,4	764,0	784,7
90	703,6	717,0	718,8	702,0	716,7	663,9	686,7
106	587,0	598,4	597,1	580,7	591,1	527,5	542,4
130	396,2	391,4	382,9	390,6	383,9	373,6	362,1
160	257,1	249,2	242,1	254,1	244,1	257,9	236,8

Termočlánek Čas, min	C449	C450	C451	C452	C453	C485
15	129,5	70,7	70,8	70,5	122,0	156,0
30	570,0	319,9	338,3	340,0	528,1	720,7
45	812,4	701,4	731,3	741,2	893,8	995,6
60	975,5	856,8	895,3	921,9	952,4	995,1
Max.	981,6	862,4	895,3	921,9	973,1	1057,4
75	798,3	774,9	777,6	798,1	782,3	797,2
90	692,0	668,8	668,1	692,2	668,1	662,2
106	534,7	530,4	526,4	560,4	513,3	485,1
130	346,9	343,6	318,8	364,5	339,4	297,6
160	225,5	219,7	199,3	234,4	221,3	147,9



Obr. 5 Záznam styčnicku čelní deskou D1/2-E1/2 termokamerou při zahřívání v 32 min; 33 min; 35 min, kdy je vidět počátek ztráty stability dolní pásnice, a při chlazení v 92 min (Poznámka: měřítko obrázků se pro zachycení linií a teplot na jednotlivých záběrech liší)

## 2. Analytický model

Pro popis teploty styčnicku se používá dvou analytických modelů. Teplotu ve styčnicku lze předpovědět obdobně jako prvků pomocí součinitele průřezu  $A_m/V$ , viz výraz (1). Pro požárně chráněné průřezy, u kterých se využije poměr  $A_p/V$ , se počítá obdobně. Teplotu nosníků pod železobetonovou deskou lze vypočítat také z teploty ve středu připojovaného nosníku, viz obr. 6 podle Annex D (EN 1993-1-2: 2005). Pro připojovaný nosník nižší nebo roven 400 mm lze teplotu  $\theta_k$  ve °C ve výšce  $h_k$  předpovědět z výrazu

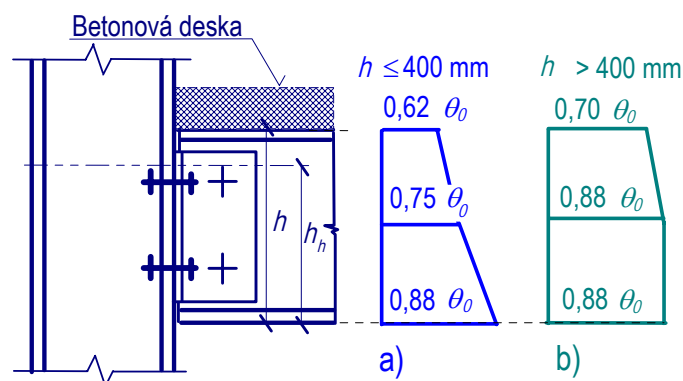
$$\theta_h = 0,88 \theta_0 [1 - 0,3 (h_k / h)] \quad (2)$$

kde  $h$  je výška připojovaného nosníku a 0,88 redukční součinitel. Pro nosník vyšší než 400 mm se teplota pro výšku  $h_k$  nižší než  $h/2$  stanoví jako

$$\theta_h = 0,88 \theta_0 \quad (3)$$

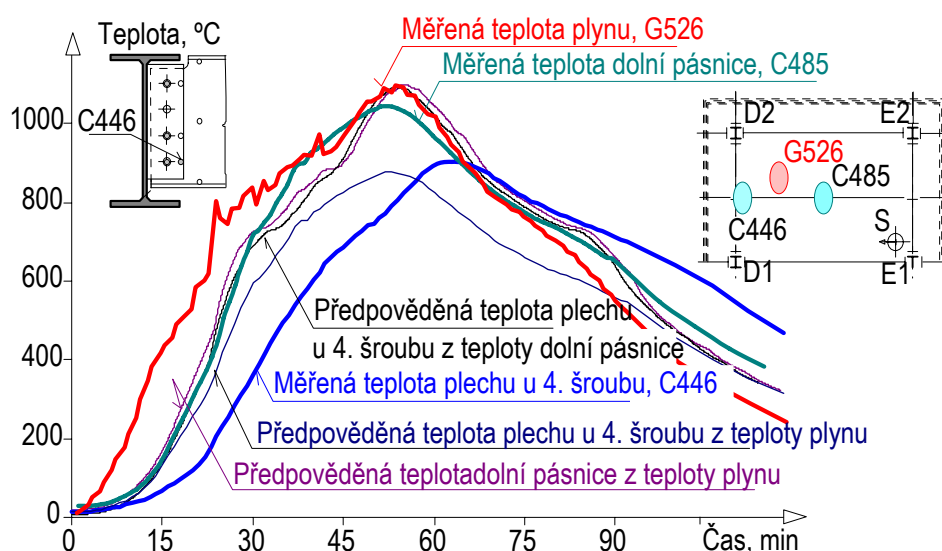
a pro výšku nosníku  $h_k$  větší než  $h/2$  z výrazu

$$\theta_h = 0,88 \theta_0 [1 + 0,2 (1 - 2h_k / h)] \quad (4)$$



Obr. 6 Výpočet teploty po výšce přípoje pro nosník  
a) do 400 mm včetně a b) nad 400 mm, viz Příloha D (EN 1993-1-2: 2005)

Porovnání obou metod s experimentem je na obr. 7. Pro metodu, která vychází ze součinitele průřezu, je koncentrace hmoty ve styčnicku zohledněna součinitelem  $A_m/V = 91,5 \text{ m}^{-1}$  a uvažuje se teplota plynu, která byla změřena poblíž styčnicku. U metody, která vychází z teploty dolní pásnice, bylo možno počítat z její změřené teploty. Je vidět, že obě metody vedou na spolehlivou předpověď při zahřívání konstrukce, ale nejsou konzervativní při jejím chladnutí. Metodou, která využívá součinitele průřezu, je předpověď méně přesná, což potvrzují numerické simulace problematiky, viz (Franssen et al, 2000). Tab. 2 zahrnuje poměr změřené teploty v daném bodě ku změřené teplotě dolní pásnice. Poměr se během zahřívání konstrukce zvyšuje. Pro dolní řadu šroubů dosahuje poměr extrému 0,90 a pro horní řadu šroubů 0,81. Obr. 3 dokládá, že v teplotách mezi šroubem a plechem nebyly změřeny rozdíly.



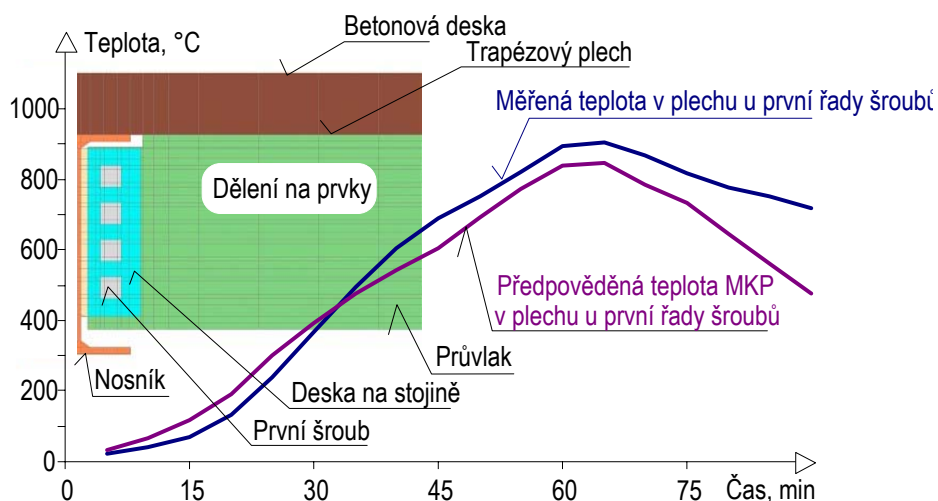
Obr. 7 Porovnání předpovědi teploty v přípoji nosníku na průvlak čelní deskou s experimentem, styčnick D1/2-E1/2



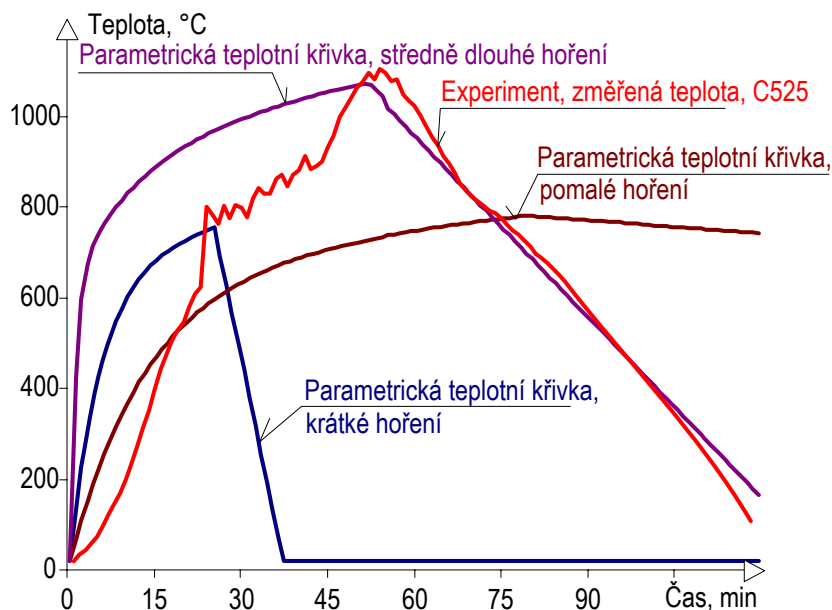
Tab. 2 Poměr naměřených teplot ve styčnicku a na dolní pásnici ve středu rozpětí; poloha termočlánků je na obr. 1

Termočlánek Čas, min	C441	C442	C443	C444	C446	C447	C448
15	0,44	0,43	0,45	0,42	0,45	0,63	0,55
30	0,48	0,49	0,51	0,46	0,51	0,59	0,59
45	0,64	0,67	0,69	0,64	0,69	0,67	0,73
60	0,81	0,87	0,90	0,81	0,90	0,85	0,92
Max.	0,78	0,83	0,86	0,79	0,86	0,81	0,86
75	0,99	1,02	1,03	0,99	1,02	0,96	0,98
90	1,06	1,08	1,09	1,06	1,08	1,00	1,04
106	1,21	1,23	1,23	1,20	1,22	1,09	1,12
130	1,33	1,32	1,29	1,31	1,29	1,26	1,22
160	1,74	1,68	1,64	1,72	1,65	1,74	1,60

Termočlánek Čas, min	C449	C450	C451	C452	C453	C485
15	0,83	0,45	0,45	0,45	0,78	1,00
30	0,79	0,44	0,47	0,47	0,73	1,00
45	0,82	0,70	0,73	0,74	0,90	1,00
60	0,98	0,86	0,90	0,93	0,96	1,00
Max.	0,93	0,82	0,85	0,87	0,92	1,00
75	1,00	0,97	0,98	1,00	0,98	1,00
90	1,05	1,01	1,01	1,05	1,01	1,00
106	1,10	1,09	1,09	1,16	1,06	1,00
130	1,17	1,15	1,07	1,22	1,14	1,00
160	1,52	1,49	1,35	1,58	1,50	1,00



Obr. 8. Porovnání předpovědi teploty v první řadě šroubů MKP s experimentem



Obr. 9 Scénáře požáru požité pro MKP simulaci rozvoje teploty v desce na stojině nosníku

### 3. Analytický model

Vliv rychlosti hoření byl simulován MKP programem SAFIR, viz (Franssen, & Brauwers, 2002). Úloha byla řešena 3-D prvky, viz obr. 8 (Kadioglu, 2005). Pro řešení byl vliv zastínění styčnicku uvažován redukcí teploty plynu kolem styčnicků z 1,0 u dolní pásnice na 0,8 u horní pásnice. Obr. 8 dokumentuje, že MKP modelem lze předpovědět teplotu přípoje deskou na stojině při experimentálním požáru v Cardingtonu, viz (Wald at al, 2005), s dobrou přesností. Kromě požáru v Cardingtonu, kde lze požární úsek při sedmé zkoušce popsat pro popis teplotní křivky parametrickým modelem pomocí vnitřního povrchu  $A_i = 298 \text{ m}^2$ , plochy svislých otvorů  $A_v = 11,43 \text{ m}^2$ ; výšky otvorů  $h_v = 1,27 \text{ m}^2$  a koeficientu otvorů  $O = 0,043225 \text{ m}^{1/2}$ , byl vyšetřován nárůst teploty v přípoji pro pomalé hoření a pro rychlé hoření ve stejném požárním úseku. Pro rychlé hoření byl volen koeficient otvorů  $0,20 \text{ m}^{1/2}$  a pro pomalé hoření  $0,025 \text{ m}^{1/2}$ . Teploty plynů pro výše popsané požáry jsou dokumentovány parametrickými teplotními křivkami na obr. 9. Porovnání předpovědi teploty modelem MKP na dolní pásnici ve středu rozpětí a v čelní desce u prvního šroubu pro rychlé a pomalé hoření je zobrazeno na obr. 10. Teplotní gradient lze vyjádřit poměrem teploty sledovaného bodu a dolní pásnice nosníku ve středu rozpětí, který je od 0,88 do 0,62 viz vztah (2). Největší spád teploty byl dosažen při rychlém požáru, kdy poměr při zahřívání konstrukce byl v rozsahu od 0,80 do 0,75. Tak jak se předpokládalo, byly nejmenší rozdíly teploty vypočteny pro pomalé hoření. Součinitel se pohyboval od 0,80 do 0,77. Analytické modely jsou porovnány s modelem MKP na obr. 11. Výsledky ukazují, že výpočet je pro rychlé hoření značně spolehlivý a pro pomalé hoření mírně nekonzervativní.

Prof. ing. František Wald CSc.; ing. Alena Tichá

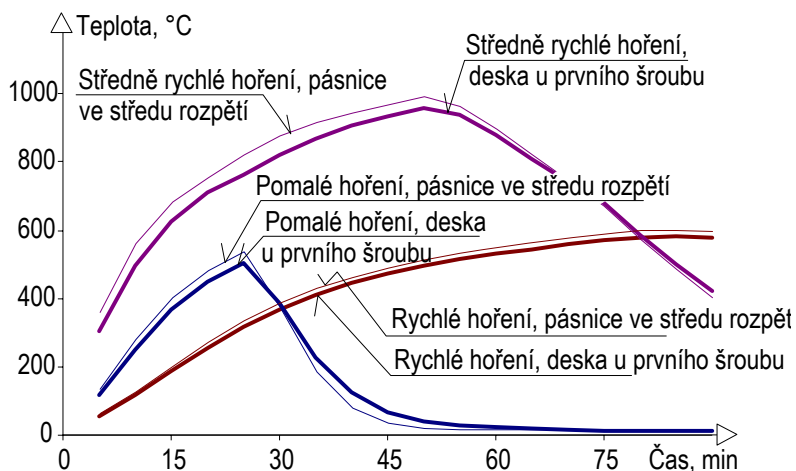
ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Thákurova 7, 166 29 Praha 6 - Dejvice

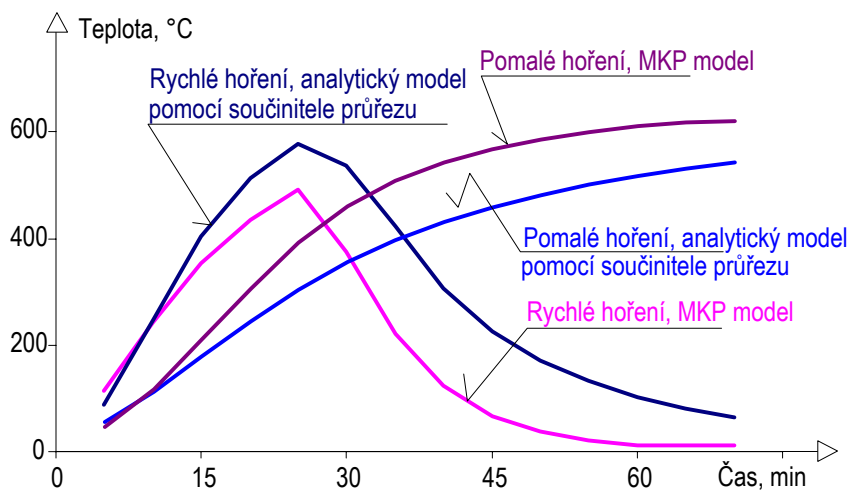
tel.: + 420 224 354 757; fax.: + 420 233 337 466; e-mail: wald@fsv.cvut.cz



Nevýrazné odlišnosti lze připustit, protože při pomalém hoření se nedosahuje tak vysokých teplot jako při středně rychlém hoření.



Obr. 10 Porovnání předpovědi teploty modelem MKP na dolní pásnici ve středu rozpětí a v čelní desce u prvního šroubu pro rychlé a pomalé hoření



Obr. 11 Porovnání předpovědi teploty čelní desky u prvního šroubu pomocí teploty ve středu rozpětí a pomocí MKP modelu pro rychlé a pomalé hoření

## Shrnutí

Experiment a MKP model potvrdil dobrou kvalitu předpovědi metodou, která je shrnuta v Příloze D dokumentu EN 1993-1-2:2005, do 45. min požáru. Při použití součinitele 0,90 místo 0,88 a 0,81 místo 0,62 bude předpověď konzervativní po celou dobu zahřívání konstrukce. Největší rozdíly teploty v přípoji byly vypočteny MKP při středně dlouhém hoření. Nově připravovaná generace analytických modelů umožní předpovědět i teplotu při ochlazování styčnicku.

## Oznámení

Tato práce vznikla s podporou Výzkumného záměru Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky, č. VZ MSM 6840770005.

## Použitá literatura

- BRAVERY P. N. R., 1993: Cardington Large Building Test Facility, Construction details for the first building Building Research Establishment, Internal paper, Watford, 158 s.
- EN 1993-1-2: 2005, Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.2 General rules, Structural Fire Design, CEN, Brussels, 78 s.
- EN 1993-1-8: 2005. Design of steel structures, General rules, Design of joints, CEN, Brussels, p. 133.
- FRANSSEN J.M, KODUR V.K.R, MASON J., 2000: User's Manual for SAFIR, a Computer Program for Analysis of Structures submitted to the fire, University of Liège, Belgium, 86 s.
- FRANSSEN, J.M., BRAUWERS, L., 2002: Numerical determination of 3D temperature fields in steel joints, Proc. of Second International Workshop Structures in Fire, Christchurch, March 2002.
- KADIOGLU E., 2005: Transfer of heat into the fin-plate connection, diplomová práce, CUST Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 98 s.
- SIMÕES DA SILVA L., SANTIAGO A., VILA REAL P., 2001: A component model for the behaviour of steel joints at elevated temperatures, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 57 (11), s. 1169-1195.
- WALD F., SANTIAGO A., CHLADNÁ M., LENNON T., BURGESS I., BENEŠ M., 2003: Tensile membrane action and robustness of structural steel joints under natural fire Part 1 - Project of Measurements; Part 2 – Prediction; Part 3 – Measured data; Part 4 – Behaviour, Internal report, BRE, Watford.
- WALD F., SIMÕES DA SILVA L., MOORE D., SANTIAGO A., 2004: Experimental Behaviour of Steel Joints under Natural Fire *v Connections in steel structures V, behaviour, strength and design*, ed. Bijlaard F.S.K, Gresnigt A.M., Van der Vegte G.J.; Bouwen met Staal, Zoetermeer 2005, s. 393-102, ISBN 90-9019509.
- WALD F., SILVA S., MOORE D.B, LENNON T., CHLADNÁ M., SANTIAGO A., BENEŠ M., 2005: Experiment with structure under natural fire, New Steel Construction 13(3), s. 24-27.
- WANG Y. C., 2002: Behaviour and design for fire safety, steel and composite structures, Spon press, London.