

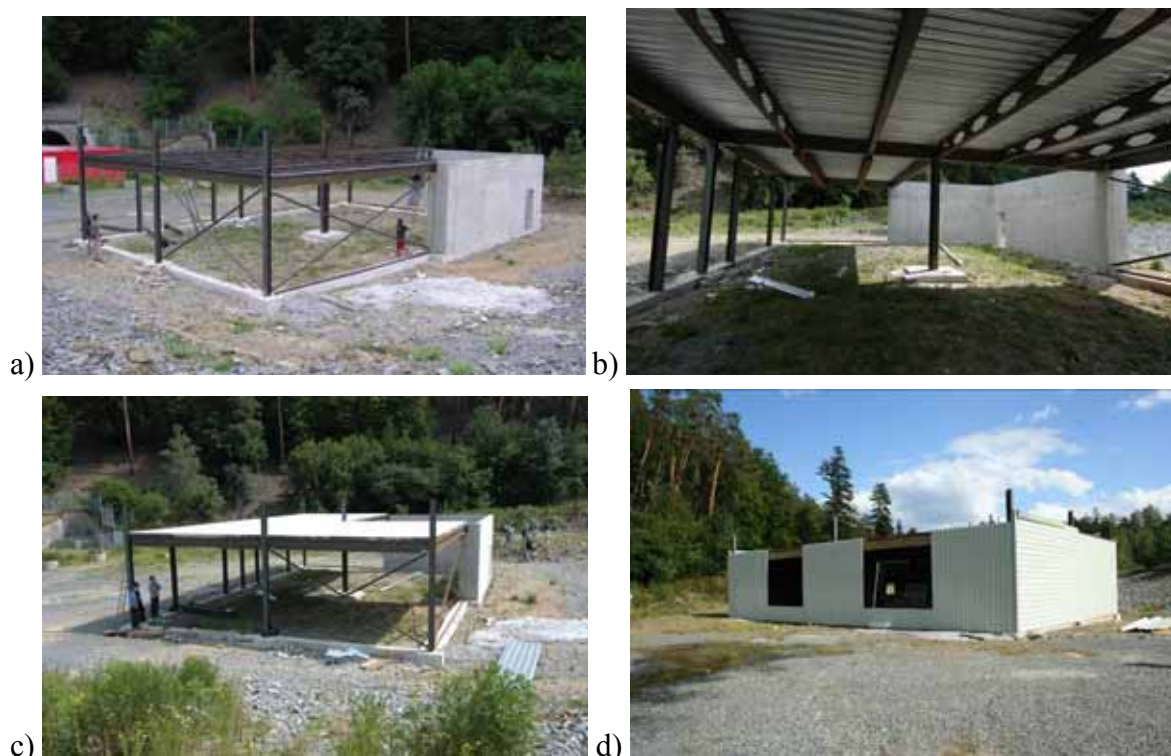
ZPRÁVA O POŽÁRNÍ ZKOUŠCE NA EXPERIMENTÁLNÍM OBJEKTU V MOKRSKU

Petra Kallerová, František Wald

ÚVOD

Hlavním cílem zkoušky bylo ověření předpovědi chování konstrukce administrativní budovy vystavené jako celku požáru. Kromě požární odolnosti tří stopních konstrukčních systémů se zkoušelo šest řešení obvodových pláštů s izolací z kamenné vlny. Výsledky zkoušky umožní využití pokročilých stavebních technologií a metod návrhu pro zvýšení spolehlivosti a ekonomie řešení požární odolnosti budov.

Požární zkouška byla zaměřena na zpřesnění popisu chování prvků a spojů v konstrukci. Výsledky umožňují zvýšit spolehlivost návrhu konstrukce vystavené zvýšené teplotě pomocí pokročilých modelů předpovědi teploty v požárním úseku, přestupu a rozvoje tepla v konstrukci a chování konstrukce vystavené zvýšeným teplotám. Při požáru byla měřena teplota, celkové i poměrné deformace, tlaky par, vlhkost, sálání z konstrukce na konstrukci uvnitř požárního úseku i na ocelovou konstrukci vně před okenním otvorem, vstup teploty a plynů pláštěm a klimatické podmínky při zkoušce. Chování bylo zdokumentováno fotografiemi, videozáznamy a záznamy z termokamer.

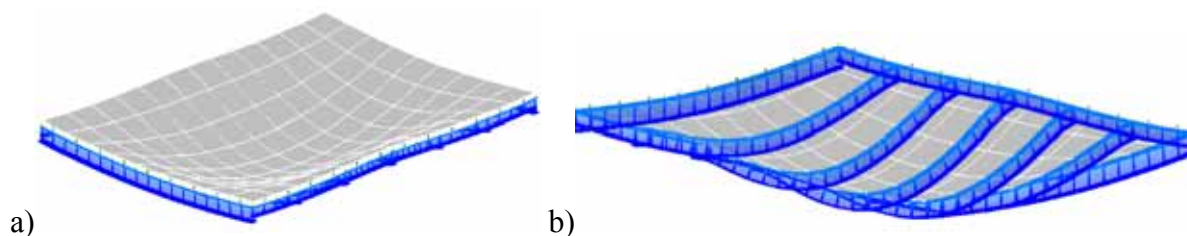


Obr. 1 Postup výstavby zkušebního objektu a) a b) nosná konstrukce, c) stropní deska, d) opláštění

Zkouška se uskutečnila 18. září 2008 v Mokrsku v okrese Příbram pod vedením pracovníků katedry ocelových a dřevěných konstrukcí fakulty stavební ČVUT v Praze, viz [1]. Pro zkoušku byl postaven objekt v areálu výukového střediska ČVUT Štola Josef v březnu až srpnu 2008. Zkouška tematicky navázala na deset velkých požárních zkoušek, které se

uskutečnily na skutečných budovách s ocelovou, betonovou a dřevěnou nosnou konstrukcí v Cardingtonu ve Velké Británii v letech 1998 až 2003, na poslední z nich se měli pracovníci ČVUT v Praze příležitost zúčastnit, viz [2]. Při zkoušce byly využity i poznatky z kolapsu WTC v roce 2001 a ze zkoušky v Ostravě v roce 2006, viz [3] a [4]. Požár jednoho podlaží administrativní budovy, viz obr. 1, poskytl podklady o rozvoji teplot a chování nosné konstrukce i obvodových plášťů vystavených zvýšeným teplotám při požáru.

Požární návrh konstrukce byl připraven na Českém vysokém učení technickém v Praze, The University of Sheffield a Slovenské technické univerzitě v Bratislavě. Ocelobetonová deska výrazně zvyšuje požární odolnost nosné stropní konstrukce i s požárně nechráněnými ocelovými nosníky. Očekávaný průhyb ocelobetonové desky 9 x 12 m v 60 min byl přibližně 700 mm, viz výstupy z programu VULCAN na obr. 2. Kromě teploty a mechanického chování styčnicků za vysokých teplot bylo při přípravě zkoušky simulováno chování subtilních prolamovaných nosníků a nosníků s vlnitou stojinou. Ve spolupráci s partnery projektu připravili projektovou a výrobní dokumentaci objektu pracovníci společnosti EXCON a.s. Praha.



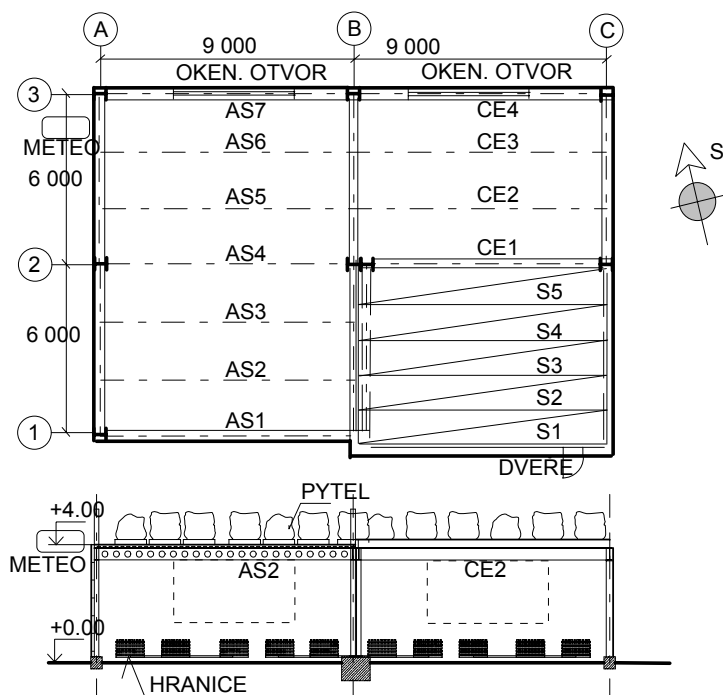
Obr. 2 Deformace a) ocelobetonové desky, b) nechráněných prolamovaných nosníků

ZKUŠEBNÍ OBJEKT

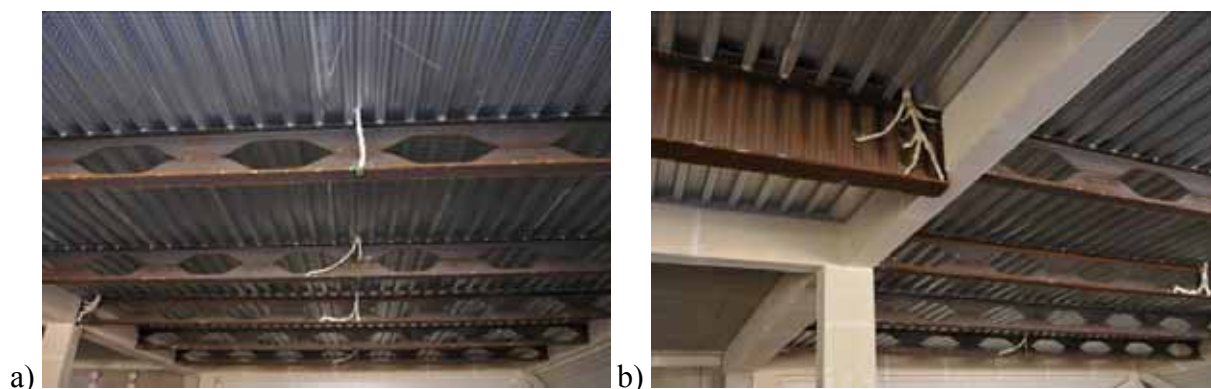
Objekt představoval část jednoho podlaží administrativní budovy o rozměrech 18 x 12 m, obr. 3. Ocelobetonová deska na prolamovaných nosníky byla navržena na rozpětí 9 x 12 m a nad nosníky s vlnitou stojinou na rozpětí 9 x 6 m. Deska byla vybetonována a do trapézových plechů CF60 (Cofraplus 0,75 mm). Deska vyztužená hladkou sítí 100 x 100 mm ϕ 5 mm o mezi pevnosti 500 MPa a krycí vrstvě 20 mm byla tlustá 60 mm a v místě žebra, které bylo vyztuženo podélnou výztuží ϕ 10 mm o mezi pevnosti 500 MPa s krycí vrstvou 20 mm, 120 mm. Po dvaceti osmi dnech byla změřena průměrná pevnost betonu 34 MPa. Jedna čtvrtina stropu byla tvořena předepnutými dutými panely Spiroll výšky 320 mm, které byly navrženy na rozpětí 9 m. Panely byly uloženy na obvodové železobetonové stěně a na průvlaku z uzavřeného průřezu, který byl vyroben ze dvou profilů IPE 400. Prolamované nosníky se sinusovým tvarem otvorů ve stojině s firemním označením Agelina výšky 395 mm byly vyříznuty a svařeny z IPE 270 z oceli S235. Nosníky s vlnitou stojinou výšky 530 mm měly pásnice šířky 220 mm a tloušťky 15 mm. Jejich stojina byla navržena z plechu tloušťky 4,5 mm o výšce 500 mm z oceli S320. Obvodové nosníky tvořily profily IPE 400 z oceli S235. Přípoje nosníků na nosník a nosníku na sloup byly navrženy pomocí čelní desky z plechu 10 mm se čtyřmi šrouby M16-8.8. Zvýšené požární odolnosti se dosáhlo umístěním dvou z nich v ocelobetonové desce. Sloupy z profilu HEB 180 z oceli S235 byly požárně chráněny. Vodorovná tuhost prutové nosné konstrukce byla zajištěna betonovými stěnami tloušťky 250 mm z betonu C30/37 a dvěma ztužidly z úhelníků L 80 x 80., viz obr. 3.

Dvě obvodové stěny tvořil skládaný plášť, který sestával z nosných kazet, kamenné vlny a vnějších trapézových plechů. V 6 m polích bylo porovnáno chování dvou systémů skládaného pláště, tj. s nosným meziroštem a vodorovným plechem a svislým vnějším plechem bez roštu. Dvě stěny tvořily sendvičové panely tloušťky 150 mm vyplněné kamennou vlnou. Na jedné stěně byly panely uloženy ve vodorovném a na druhé ve svislém

směru. Část betonové stěny byla zevnitř přizděna stěnou ze sádrových tvárnic. Požární ochrana sloupů, průvlaků, obvodových nosníků a ztužidel byla na požární odolnost R60 řešena obkladem deskami 2x15 mm Promatect H.



Obr. 3 Schéma konstrukce pro požární zkoušku na experimentálním objektu s označením nosníků



Obr. 4 Nosná konstrukce experimentální objektu
a) prolamované nosníky s termočlánky, b) požární obklad sloupů a průvlaků

MECHANICKÉ ZATÍŽENÍ

Mechanické zatížení bylo navrženo tak, aby odpovídalo běžné administrativní budově, ve které se proměnné zatížení pohybuje v rozmezí 2,5 až 3,5 kN/m². Statisticky je ověřeno, že za požární situace mechanické zatížení nedosahuje největších hodnot. Vlastní tíha zkoušené ocelobetonové konstrukce dosáhla 2,6 kN/m². Při zkoušce bylo proměnné zatížení 3,0 kN/m² vyvozeno pomocí 78 pytlů se šterkem, každý o hmotnosti cca 900 kg. Pytle byly umístěny na železobetonové stropní desce na paletách, na předpjatých dutých panelech byly uloženy volně, viz obr. 5a,b. Hmotnost každého pytle byla ověřena vážením kalibrovaným tenzometrickým můstkem před jeho instalací. Pohybovala v rozmezí 793 kg až 1087 kg. Pytle byly ve skupinách rozloženy tak, aby se dosáhlo rovnoměrného zatížení. Při mezním stavu na

mezi únosnosti za běžné teploty by zatížení odpovídalo proměnnému zatížení $3,0 \text{ kN/m}^2$ a zatížení podlahami a příčkami $1,0 \text{ kN/m}^2$ v charakteristických hodnotách.



Obr.5 Zatížení a) a b) mechanické pytlí se štěrskem, c) požární dřevěnými hranoly, d) samostatně stojící lešení na měření deformací

POŽÁRNÍ ZATÍŽENÍ

Požární zatížení administrativní budovy se pro požární zkoušky konstrukcí simuluje nehoblovanými latěmi rozměrů $50 \times 50 \times 1000 \text{ mm}$ z měkkého dřeva. Celkový objem dřevní hmoty byl 15 m^3 . Na půdorysné ploše požárního úseku bylo rovnoměrně rozmístěno 50 hranic, viz obr. 5c. Každá hranice obsahovala 12 řad po 10 latích, celkem 120 latí, tj. asi $35,5 \text{ kg/m}^2$ dřeva, což odpovídá asi 620 MJ/m^2 . Požární zatížení běžné administrativní budovy při jejím návrhu se uvažuje 420 MJ/m^2 . Navržené množství paliva tak přesáhlo o asi 50 % množství, které se nachází v budově tohoto určení.

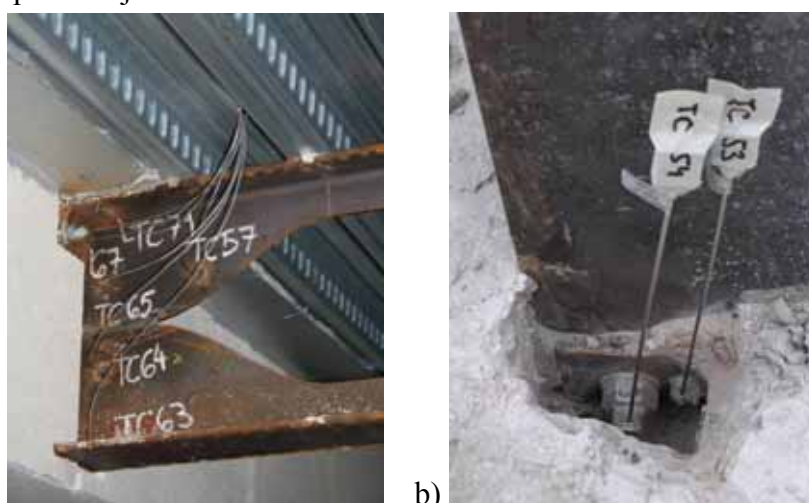
Ve třetí vrstvě byly tři nebo čtyři dřevěné hranice navzájem propojeny tenkostěnným profilem tvaru U. Profily byly vyplněny kamennou vlnou a napuštěny petrolejem, který umožnil rychlé hovoření paliva při zapálení na třech místech zapálení. Počátek zkoušky označil její velitel akusticky při dosažení teploty plynu 50 °C . Ventilace byla při požáru zajištěna okenními otvory, které odpovídají moderní podlažní budově. Parapet dosahoval do výšky 1 m a okna výšky 2,54 m a celkovou délku 8,00 m. V oknech nebyla skleněná výplň.

MĚŘENÍ

Teplota plynu byla měřena pláštovými termočládky o průměru 3 mm a teplota nosných konstrukcí termočládky o průměru 2 mm. Teplota plynu byla měřena 14 termočládky v úrovni dolních pásnic nosníků, tj. 500 mm pod stropní deskou. Mezi okny a vzadu pod středem posledního prolamovaného nosníku byla měřena teplota po výšce požárního úseku. V ocelobetonové desce bylo umístěno 12 termočládků, na nosnících 11, ve šroubových přípojkách 37, viz obr. 6, v dutých panelech 6, v betonové stěně 16, a obvodových pláštích 24,

na vnitřním sloupu 7 a u venkovního sloupu 24 termočlánků. Na západní straně lešení byla umístěna meteorologická stanice pro měření venkovní teploty a rychlosti a směru větru.

Kolem objektu byla postavena nezávislá konstrukce lešení, kterou navrhla společnost SGB CZ a.s. Po kratších stranách objektu bylo použito řadové lešení. Mezi okenními otvory a vzadu za objektem byly navrženy lešeňové věže, které nesly přemostěné zkušební objektu dvojicemi příhradových lešeňových vazníků na rozpětí 14 m. Měření svislých deformací stropu objektu umožňovaly dvojice dřevěných lepených bednicích nosníků na rozpětí 9 m 1,5 m nad stropem zkušební budovy, viz obr. 5d. Geodeticky se deformace stanovovaly trigonometricky pomocí osmi 3 m tyčí s terči, které byly vztyčeny na stropě. Pro určení rozvoje vnitřních sil v konstrukci při požáru bylo na stojiny nosníků osazeno sedm keramických tenzometrů do vysokých teplot, které měřily poměrné deformace. Dále byla měřena vlhkost a napětí betonových a sádrových stěn vystavených přirozenému požáru. Dvanáct videokamer a čtyři termokamery zaznamenaly chování a rozvoj teplot v konstrukci a na jejím vnějším plášti objektu.

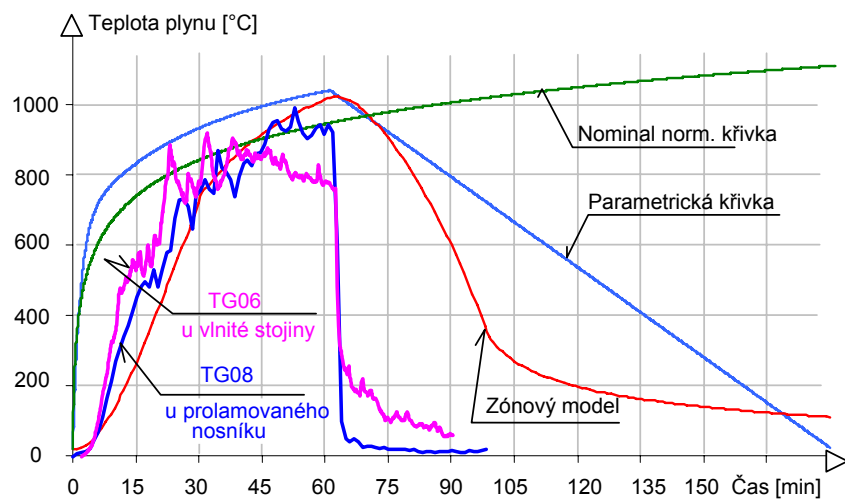


Obr. 6 Termočlánky na konstrukci a) styčník, b) šroub zabetonovaný v desce

TEPLOTA PLYNU

Výpočty zónovým modelem a parametrickou teplotní křivkou konzervativně předpokládaly, že by teplota mohla v čase 60 min dosáhnout 1057 °C požáru, viz obr. 7. V prostoru pod betonovou deskou s prolamovanými nosníky byla naměřena nejvyšší teplota 935°C v 60. min.

Vlivem odnímání tepla masivní betonovou stěnou byla levá část požárního úseku pod panely s dutinami podle předpokladu chladnější. V 21. zde došlo k nárůstu teploty na 810°C a ve 30. min na 935°C. V 58. min zde teplota plynu dosáhla 855 °C. Průběh teploty plynu na čase byla velmi blízký závislosti, kterou popisuje nominální teplotní křivka, viz [5]. Na obrázku je zachycena i předpověď pomocí parametrické teplotní křivky a zónovým modelem. Na obr. 7 je vidět, že v přední levé části byla změřena vyšší teplota plynu, což je obecně způsobeno na začátku požáru vyššími teplotami vepředu požárního úseku a mírným větrem. Stěna s okny je situována pod 21° na SV. Na počátku zkoušky u objektu převažoval podle měření meteorologické stanice mírný západní vítr, viz obr. 8a. V průběhu zkoušky došlo k otočení větru a po snížení povrchu odhořívajícího paliva v přední části požárního úseku byla změřena nejvyšší teplota v zadní části požárního úseku pod prolamovanými nosníky, viz obr. 8b. Graf na obr. 9 znázorňuje změřené nejvyšší rychlosti větru meteorologickou stanicí, která byla umístěna ve výšce 4 m na severní straně západního lešení. Průměrné teploty plynu v jednotlivých čistých požárního úseku jsou zachyceny na obr. 10.

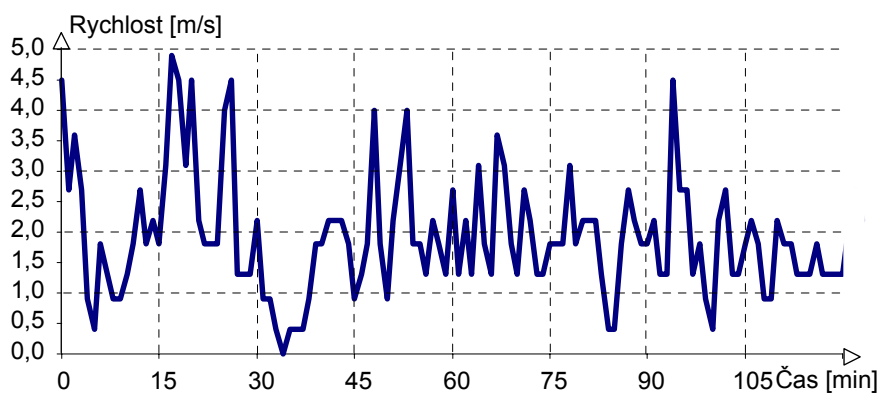


Obr. 7 Porovnání předpovědi teploty plynu s naměřenými hodnotami

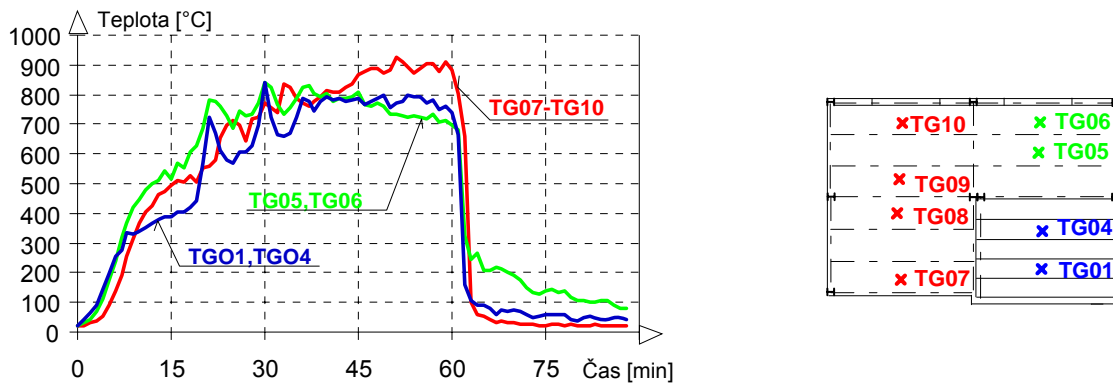


Obr. 8 Průběh požáru ovlivnění rozvoje požáru větrem

a) západní vítr v 17. min; b) východní vítr v 53. min



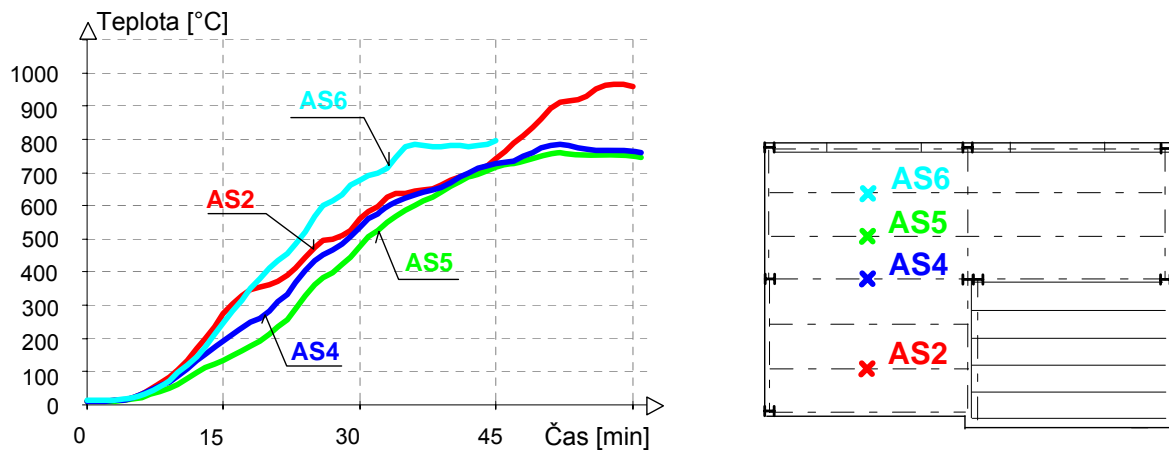
Obr. 9 Rychlost větru změřená u zkušebnímu objektu na severní straně západního řadového lešení



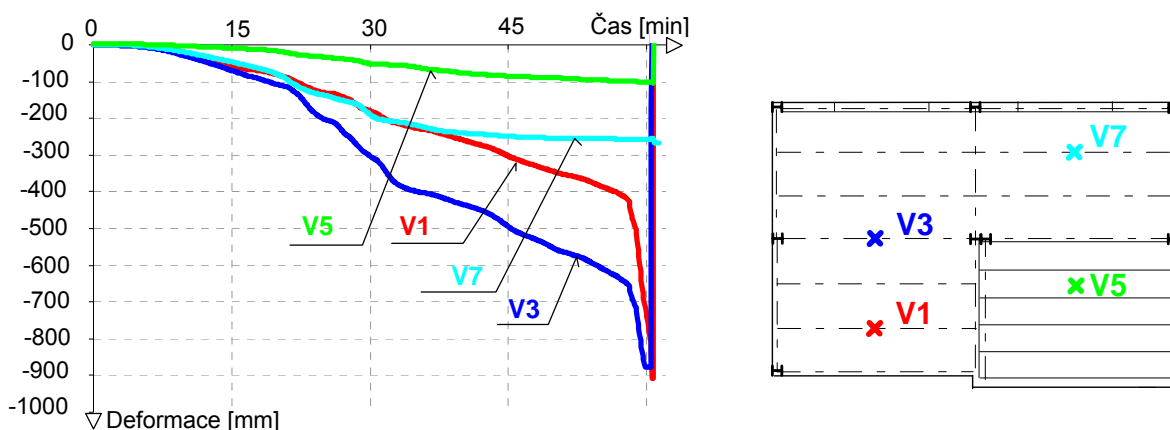
Obr. 10 Průměrné teploty plynu v polích pod prolamovanými nosníky, nosníky s vlnitými stojinami a předepnutými dutinovými panely

CHOVÁNÍ KONSTRUKCE

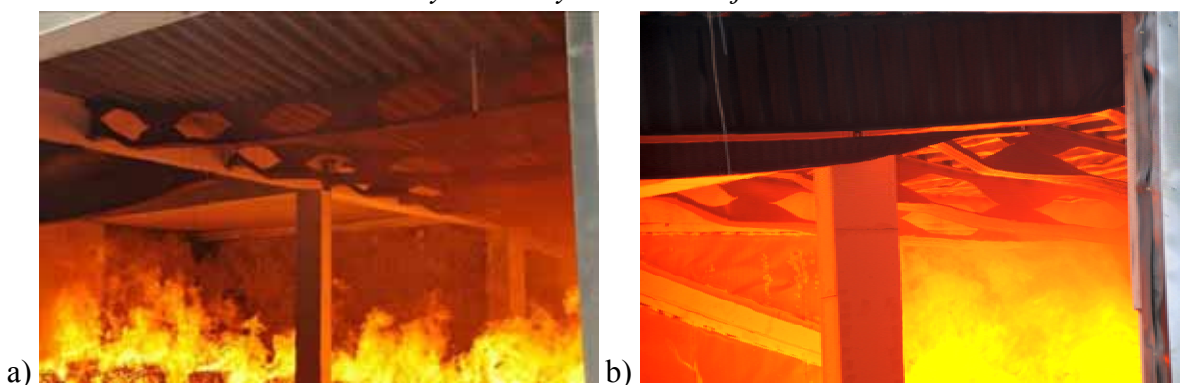
Nechráněné prolamované nosníky dosáhly ve 23. min asi 480 °C při průhybu 135 mm, viz obr. 11. Jejich únosnost se začala redukovat, viz [6], průhyb 135 mm. Ve 34. min požáru měly nosníky již teplotu 770 °C, které odpovídá únosnost asi 10 % únosnosti za běžné teploty a průhyb 378 mm, viz obr. 12. K porušení desky došlo v 62. min požáru na počátku fáze chladnutí při změřené teplotě nosníků 895 °C. V té době byla deska namáhána na asi 167 % únosnosti stanovené podle zjednodušeného návrhového modelu pro dané mechanické a požární zatížení na 3,49 kN/m².



Obr. 11 Teplota dolních pásnic ve středu prolamovaných nosníků AS2 až AS6

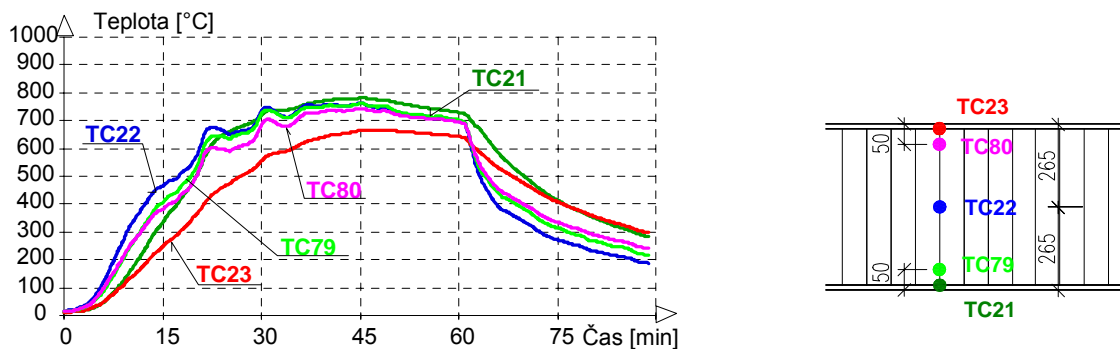


Obr. 12 Průhyb stropu, desky s prolamovanými nosníky V1 a V3, panelu s dutinami V5 a desky s nosníky s vlnitou stojinou V7

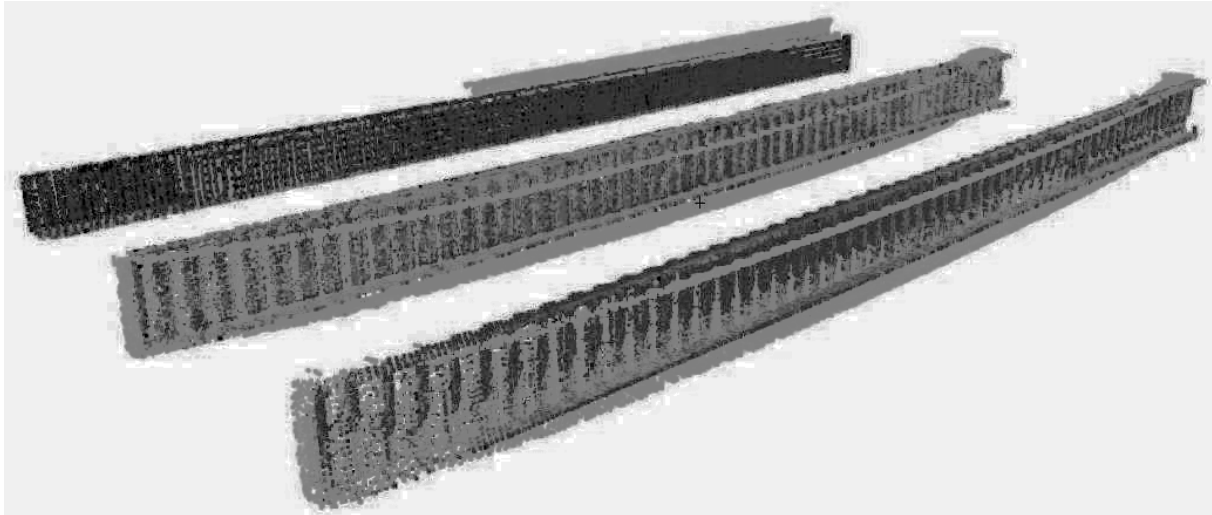


Obr. 13 Deformace ocelových nosníků smykem v 45. min, a) prolamované nosníky, b) nosníky s vlnitou stojinou

Ocelobetonovou desku nad ocelovými požárně nechráněnými nosníky s vlnitou stojinou se nepodařilo porušit. Nosníky dosáhly největšího průhybu 256 mm a nejvyšší teploty 780 °C, viz obr. 14. Membránové působení ocelobetonové desky se projevilo od 20. min požáru, kdy teplota nosníku překročila 450 °C a plně se rozvinulo ve 32. min požáru, kdy dosáhla 715 °C a únosnost nosníků byla redukována na pouze 15 % únosnosti za běžné teploty. Deformace této části konstrukce je zachycena na vizualizaci výsledků laserového skenování, viz obr. 15.



Obr. 14 Teploty na nosníku s vlnitou stojinou uprostřed rozpětí



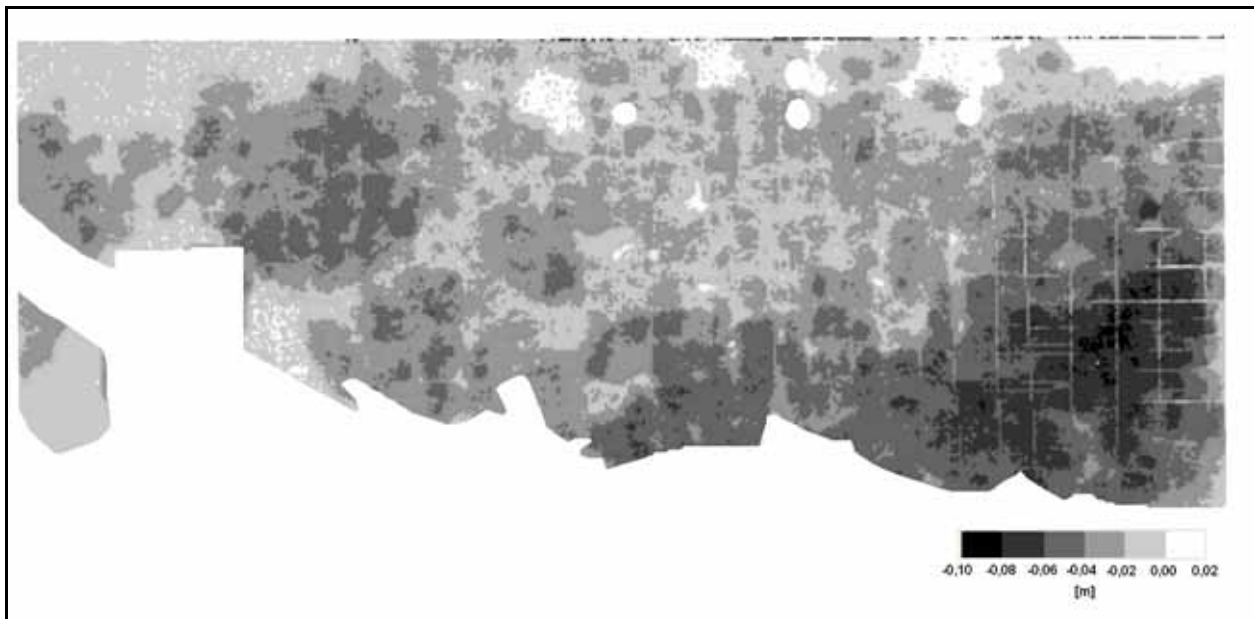
Obr. 15 Porovnání deformace nosníků s vlnitou stojinou před a po zkoušce překrytím vizualizace výsledků laserového skenování

Třetí část stropu byla tvořena dutými předepnutými betonovými panely. Tato část stropu se prohnila o 100 mm. Bylo ověřeno jejich chování za vysokých teplot a jejich požární odolnost R60.

Ve dvacáté min požáru začala na vnější straně železobetonové stěny prýštit voda a na vnitřní straně beton začal explozivně oprýskávat, viz obr. 16. Tlak par postupně odštěpil povrchové vrstvy betonu a odhalil výztuž. Po zkoušce byla stěna, viz obr. 17, a nosný sloup pod průvlakem oslabeny až o 73 mm.

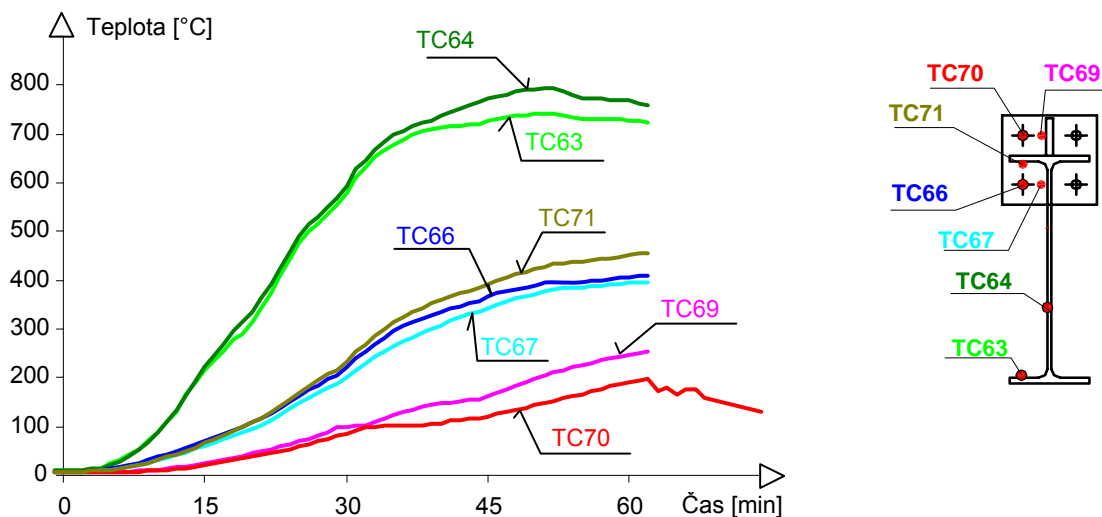


*Obr. 16 Betonová stěna při zvýšené teplotě
a) vylučování vody na vnější straně, b) oprýskávání betonu na vnitřní straně*



Obr. 17 Otrýskání monolitické železobetonové stěny ve vizualizaci rozdílového modelu laserového skenování

Součástí zkoušky byl vývoj spojů se zvýšenou požární odolností, které se dosahuje jejich zakrytím v betonové desce. Teplota dolní části přípoje dosáhla 520°C při teplotě nosníku 935°C. Teplota horní části přípoje, která byla zakryta ocelobetonovou deskou, nepřekročila 195 °C. Spoje se před porušením desky plasticky deformovaly. Na obr. 18 je vykreslen průběh teploty ve styčnicku prolamovaného nosníku AS5 na chráněný průvlak v závislosti na čase.



Obr. 18 Teploty ve styčnicku prolamovaného nosníku AS5

Před okenním otvorem požárního úseku byl instalován ocelový sloup, který představoval ocelovou konstrukci vně požárního úseku. Vzdálenost venkovního sloupu od okenního otvoru byla 1000 mm. Teplota konstrukce byla měřena pomocí 16 termočlánků v osmi výškových úrovních. Vždy se měřila teplota na obou pásnicích IPE profilu sloupu. Ve stejné výšce byla měřena teplota plynu pomocí 8 termočlánků, které byly ve vzdálenosti 100 mm od bližší pásnice směrem k okennímu otvoru. V závislosti na umístění termočlánků po výšce nosníku dosahovaly teploty konstrukce 220 - 400°C a teploty plynu 100 - 550°C.

Důležitou součástí zkoušky bylo ověření požární odolnosti sendvičových panelů a skládaného pláště s izolací z kamenné vlny. U skládaného pláště dosáhla teplota vnitřního líce špičkově až 1055 °C. Přírůstek teploty vnější strany stěnových plášťů s kazetami dosáhl průměrných hodnot menších než 100 K, v maximum 114 K. U sendvičových panelů byla na vnitřním líci měřena nejvyšší teplota 950 °C ve 31 min a na vnějším líci 37 °C v 62 min. K porušení plášťů do 61. min zkoušky nedošlo. Při nejvyšší teplotě vnitřního povrchu pláště kolem 930 °C nepřekročily povrchové teploty vnějšího pláště kritéria požární odolnosti podle evropské zkušební metodiky.

Porušení stropu experimentálního objektu nastalo prolomením ocelobetonové desky v pravém zadním rohu po ztrátě její únosnosti v tlaku v 62. min experimentu, viz obr. 19. Krajiní nosník se na vzniklé volné části porušil klopením. Vlivem otrýskání horní části železobetonového sloupu došlo k odhalení kotvení průvlatku. Při poruše krajního nosníku byla tak přípoj průvlatku na sloup namáhán na kroucení, kterým se poručil, viz obr. 20.



Obr. 19 Pohled na porušenou ocelobetonovou desku



*Obr. 20 Roh ocelobetonové desky, kde začalo porušení, po zřícení,
a) okrajové nosníky, b) porušený roh desky*

SHRNUTÍ

Požární zkouška prokázala, že chování konstrukce vystavené požáru jako celku lze vhodným návrhem využít a zvýšit požární spolehlivost i ekonomii řešení. Podařilo se dosáhnout kolapsu ocelobetonové desky a prokázat požární odolnost R60 použitých konstrukčních částí i pláště. Po zhodnocení jednotlivých poznatků, jejich ověření experimenty s dílčími prvky a rozšíření jejich platnosti numerickou simulací umožní výsledky přípravu

podkladů pro evropské návrhové normy mj. v oblasti chování ocelobetonové desky, chování styčnicků a plášťů budov při vystavení zvýšeným teplotám při požáru.

OZNÁMENÍ

Příprava, provedení a vyhodnocení zkoušky byly mimo jiné podpořeny výzkumným centrem MŠMT CIDEAS č. 1M0579, výzkumným záměrem MŠMT Udržitelná výstavba MSM 6840770005 a granty Metoda komponent pro navrhování styčnicků za zvýšené teploty GAČR103-07-1142 a Požárně odolné styčnický MŠMT OC 190.

LITERATURA

- [1] Kallerová P. a Wald F., Požární zkouška na experimentálním objektu v Mokrsku, ČVUT v Praze, srpen 2008, ISBN 978-80-01-04146-8.
- [2] Wald, F., Simões da Silva, L., Moore, D.B., Lennon, T., Chladná, M., Santiago, A., Beneš, M. and Borges, L., Experimental behaviour of a steel structure under natural fire” Fire Safety Journal 2006, Volume 41, Issue 7, pp. 509-522.
- [3] Kallerová P. and Wald F., Ostrava fire test Czech Technical University, Praha, CIDEAS report No. 3-2-2-4/2, p.18., www.cideas.cz.
- [4] Chlouba J., Wald F., Sokol Z., Temperature of connections during fire on steel framed building, in International Journal of Steel Structures, přijato do tisku.
- [5] ČSN EN 1991-1-2, Zatížení konstrukcí, část 1-2: Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru, ČNI Praha, 2006.
- [6] ČSN EN 1993-1-2, Navrhování ocelových konstrukcí, část 1-2: Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČNI Praha 2008.

PARTNEŘI PROJEKTU

Na zkoušce se kromě ČVUT v Praze podílely i Ústav teoretické a aplikované mechaniky (ÚTAM AV ČR), Pavus a.s., The University of Sheffield, Slovenská technická univerzita v Bratislavě, Generální ředitelství hasičského záchranného sboru MV ČR, Profesionální komora požární ochrany, Technický a zkušební ústav požární ochrany a Fakulta bezpečnostního inženýrství Vysoké školy báňské v Ostravě a společnosti, která realizovaly konstrukci objektu. Výstavbu a demolici experimentální budovy zajistily ArcelorMittal Long Carbon R&D Centre, EXCON a.s., Rockwool a.s., Promat s.r.o., HAIRONVILLE VIKAM s.r.o., Metrostav a.s., TBG Metrostav s.r.o., DYWIDAG PREFA a.s., Kovové profily s.r.o., Kingspan a.s., SGB a Hünnebeck CZ s.r.o., Skála a Vít s.r.o. a další. Public relation podporu zajišťovala Donath-Burson-Marsteller. Mediálním partnerem byl časopis Konstrukce.

