

# STATICKÁ ANALÝZA KONSTRUKCE PO POŽÁRU

Petr Müller\*

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,  
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.  
petr.muller.1@fsv.cvut.cz

## ABSTRAKT

Předmětem článku je popis provedení statického posudku objektu, který slouží jako hasičský simulátor a jehož konstrukce jsou opakovaně vystavovány vysokým teplotám. Požadavek majitele objektu spočíval v provedení diagnostiky konstrukce, zhodnocení míry jejího poškození, a dále návrhu případného zesílení pro možnost dalšího využívání objektu.

V rámci posudku byla provedena předběžná i podrobná prohlídka objektu. S využitím specifických okrajových podmínek byla provedena simulace vývoje tepla v daných prostorech. Na základě těchto podkladů byly určeny konstrukční prvky k odběru vzorků a provedení nedestruktivních i laboratorních materiálových zkoušek. Výsledky laboratorních a in-situ zkoušek byly porovnány s teoretickými výpočty a použity pro výpočet reziduální únosnosti prvků. V závěru byly předepsány konstrukční úpravy a lokální sanace pro zajištění odpovídající trvanlivosti konstrukce.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Železobeton • Požární odolnost • Diagnostika • CFD analýza

## ABSTRACT

This paper is aimed at describing conducted post-fire structural assessment. The subjected building is used as firefighting simulator and thus is repeatedly exposed to high temperatures. The task from building owner was to conduct structural diagnosis, assess the decay of structural performance and to design eventual strengthening in order to ensure future use of subjected building.

Within the assessment preliminary and detailed inspections were conducted. Using specific boundary conditions simulation of temperature rise and distribution was carried out. Based on such data several structural elements and spots were chosen to be inspected in detail by both non-destructive and laboratory material tests. For such purposes test specimens were cut out of the structure. Theoretical results gained from calculations were compared with experimental ones and based on it residual load-bearing capacity was calculated. Finally, several refurbishments were designed in order to ensure adequate structural durability.

## KEYWORDS

Reinforced concrete • Fire resistance • Diagnosis • CFD analysis

## 1. ÚVOD

V průběhu roku 2019 měl autor článku možnost spolupracovat na vypracování statického posudku konstrukce opakovaně vystavované působení vysokých teplot. Protože se jedná o problematiku velmi blízkou zaměření disertační práce autora s možností přímé aplikace zjištěných poznatků a postupů, autor příležitosti s povděkem využil.

Předmětem statického posudku je objekt „ohněvého domu“ (OD), který je součástí školního a výcvikového zařízení HZS ČR v Brně. Objekt slouží jako trenažér zásahu v prostředí s vysokými teplotami a plameny, které jsou generovány plynovými hořáky umístěnými na několika místech v objektu. OD je dvoupodlažní objekt s jedním podzemním podlažím. Jeho konstrukce je převážně tvořena železobetonovými (ŽB) stěnami a stropními deskami doplněná o dílčí ocelové zastropění a zastrešení (viz Obr. 1).



Obrázek 1: Objekt ohněvého domu (Procházka a kol., 2019).

V rámci požárních zkoušek, které se v OD primárně konají, je zažehnut vybraný hořák (vždy pouze jeden v rámci celého objektu) a během velmi krátké doby je dosaženo vysokých teplot (až 1000 °C). Do takto rozvinutého „požáru“ přijdou hasičtí učni s proudnicemi a vodními proudy „hasí“ plameny a „ochlazují“ okolní konstrukce. Požární zkouška končí po několika (maximálně 3) minutách, kdy je vypnut přívod paliva.

Ve všech místnostech OD s instalovanými hořáky jsou okenní či dveřní otvory umožňující přívod kyslíku během hoření. V těchto místnostech jsou dále instalovány ochranné

\* Školitel: prof. Ing. Jaroslav Procházka, CSc.; školitel specialista: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

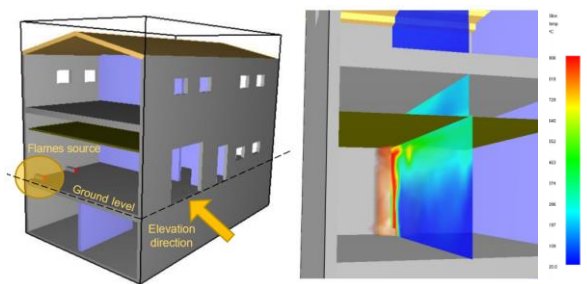
konstrukce, aby nosné konstrukce nebyly vystaveny přímo působení plamenů, vysokých teplot a také ochlazení během „hašení“. Ochranné konstrukce jsou tvořeny plechovými šablonami na ocelovém roštu a jsou instalovány na stropní konstrukce i stěny. Dutiny v podhledech a na stěnách jsou dále během zkoušky přetlakově větrány pomocí ventilátorů (Procházka a kol., 2019).

## 2. SIMULACE VÝVOJE TEPLOT

Aproximace průběhu požáru a vývoje teplot v prostorách zasažených požárem je vždy nedílnou součástí vyšetřování po požáru, neboť získané informace mohou zajistit efektivnější vedení diagnostiky, vytipovat nejvíce exponované prvky a také posloužit jako podklad pro teoretické výpočty. Po jejich verifikaci je možné redukovat počet materiálových zkoušek, což šetří finance, čas i pracnost. Volba požárního scénáře je tak jedním ze zásadních kroků analýzy.

Dle metodiky ČSN EN 1991-1-2 jsou k dispozici modely požáru různé složitosti i komplexnosti. Nejjednodušším modelem požáru jsou nominální teplotní křivky (např. křivka ISO 834 či uhlovodíková). Komplexnější popis lze získat použitím zjednodušených (parametrické teplotní křivky či modelu lokálního požáru) či zdokonalených modelů požáru (zónové modely a modely proudění tekutin, tzv. CFD modely). CFD (z anglického *computational fluid dynamics*) simulace v současné době představují nejpodrobnější a nekomplexnější přístup k modelování požáru. Simulace jsou velmi výpočetně náročné a jsou citlivé k přesnosti vstupních údajů. Více o volbě a modelování požárních scénářů lze najít např. v (Benýšek, 2019) a (Horová, 2012).

V případě posudku OD nastala situace netypická pro reálné požáry – všechny vstupní parametry o vývoji požáru během zkoušky byly známy (např. tepelný výkon hořáků a jejich pozice, geometrie požárního úseku, podmínky ventilace, maximální čas požáru, apod.). Za těchto okolností bylo rozhodnuto o provedení CFD simulace jakožto nejpřesnějšího možného nástroje. Simulace byla provedena Ing. Martinem Benýškem (Procházka a kol., 2019). Ilustrativní obrázek s celkovým 3D modelem objektu a rozložením teploty v garáži v čase ukončení zkoušky je uveden na Obr. 2.



Obrázek 2: CFD model objektu (vlevo), maximální teplota plynu v čase ukončení zkoušky ( $\theta_{max}=906\text{ °C}$ ) (Procházka a kol., 2019).

Na základě provedené CFD analýzy byla dobře patrná místa s nejvyššími dosaženými teplotami. Časový vývoj povrchových teplot byl nadále použit jako zadání pro teplotní analýzu konstrukčních prvků a získání jejich teplotních profilů.

## 3. DIAGNOSTIKA KONSTRUKCE

### 3.1. Předběžná prohlídka objektu

Úvodním krokem diagnostiky konstrukce byla předběžná prohlídka. Během té se autor seznámil s předmětným objektem a dále mu byla předvedena požární zkouška, viz Obr. 3. V době provádění prohlídky byla ještě většina ochranných obkladů instalována a tudíž nebylo možno vizuálně zhodnotit stav nosných konstrukcí. Nezakryté konstrukce však bylo možno hodnotit jako viditelně nepoškozené, bez nadměrných trhlin nebo obnažené výztuže.

V rámci předběžné prohlídky bylo dále zadáno odebrání vzorků z konstrukcí k laboratorním zkouškám. V případě ŽB konstrukcí se jednalo o jádrové vývrtky o průměru 100 mm, v případě ocelových konstrukcí se jednalo o vyříznutí alespoň 10 cm dlouhých pásků ze spodních pásnic IPE nosníků. Celkem byly zadány k odběru 2 vývrtky ze stropní desky, 6 vývrtů ze stěn a 3 vzorky oceli.



Obrázek 3: Požární zkouška v garáži (Procházka a kol., 2019).

### 3.2. Podrobná prohlídka objektu

Podrobná prohlídka objektu byla provedena ve chvíli, kdy byly z konstrukcí demontovány ochranné šablony a všechny konstrukce byly přístupné vizuálnímu zhodnocení a provedení nedestruktivní tvrdoměrné zkoušky ŽB konstrukcí.



Obrázek 4: Trhlina v desce 1.PP (Procházka a kol., 2019).

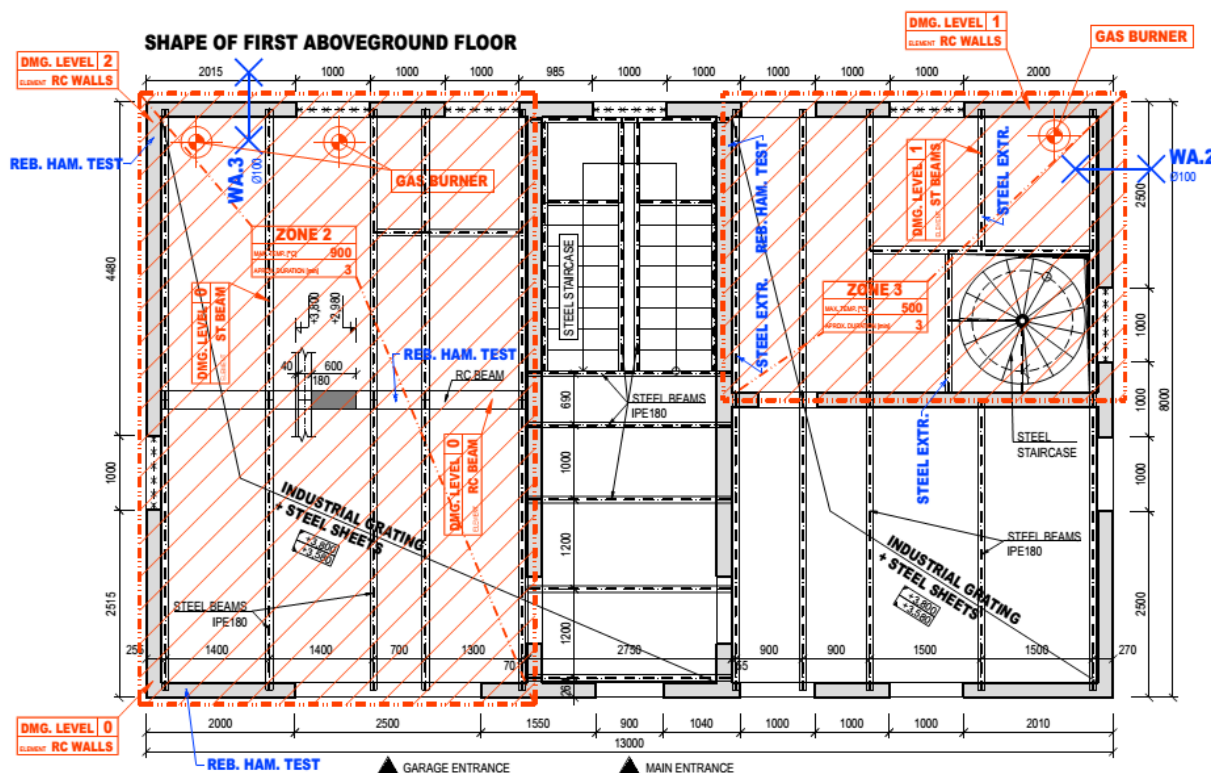
ŽB konstrukce v blízkosti hořáků lze po vizuálním zhodnocení charakterizovat jako viditelně nepoškozené. Jejich povrch není nadměrně rozpraskaný (nejvíce jsou rozpraskaná nadpraží oken, kudy proudí horký vzduch ven z objektu), beton není odštěpený, výztuž není obnažená ani vybočená či nesoudržná. Stropní deska nevykazuje nadměrné průhyby. Jedinou viditelnou poruchou je tak nadměrně široká ohybová trhlinka na spodním líci stropní desky 1.PP (šířka trhliny  $w_k = 0,4-0,6$  mm), přes kterou dlouhodobě prosakuje voda a tvoří malé krápníky (viz Obr. 4).

Ocelové konstrukce v rámci OD tvoří zastropení 1.NP, zastřešení 2.NP a schodiště. Konstrukce hlavního schodiště se nachází ve středním traktu objektu, kde požární zkoušky neprobíhají, a proto jimi není ovlivněna. Prvky zastřešení 2.NP jsou proti účinkům vysokých teplot chráněny intenzivním provětráváním celého podstřešního prostoru. Ocelové zastropení v 1.NP – levém traktu je taktéž chráněno intenzivně větranou mezerou nad podhledem. Jedinou rizikovou částí konstrukce je tak zastropení 1.NP – pravé části. Dutina v podhledu zde není během zkoušek větraná, na druhou stranu jsou plameny a tedy i proudění horkého vzduchu usměrněny do prostupu stropní konstrukcí pro (již nepoužívané) točité schodiště. Stropní konstrukce v této části objektu po sejmutí

podhledu je zobrazena na Obr. 5. Na stropnicích je viditelně poškozený nátěr a na spodní přírby nosníků jsou „napečené“ kusy podhledových šablon. U prvků je také podezření na pokročilejší stav koroze. Na druhou stranu nejsou nosníky lokálně vyboulené ani zprohýbané a nejeví známky přetížení.



Obrázek 5: Neventilovaný ocelový strop 1.NP po odstranění podhledů (Procházka a kol., 2019).



Obrázek 6: Grafický výstup podrobné prohlídky 1.NP (Procházka a kol., 2019).

Dílčí část výsledku podrobné prohlídky OD je graficky shrnuta na Obr. 6. Jsou zde vyznačeny oblasti zasažené vysokými teplotami (u každé zóny je uvedena maximální dosažená teplota a čas požární zkoušky). Dále jsou zde zakresleny pozice hořáků a zasažené konstrukční prvky, které jsou zaříděny do tzv. tříd poškození dle metodiky publikované v (Concrete Society, 2008). Ve schématu jsou dále zanesena místa odběru vzorků pro laboratorní zkoušky a provedení nedestruktivní tvrdoměrné zkoušky ŽB konstrukcí.

\* Školitel: prof. Ing. Jaroslav Procházka, CSc.; školitel specialista: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

### 3.3. Materiálové zkoušky

Dalším krokem diagnostiky OD bylo provedení materiálových zkoušek za účelem zjištění skutečných mechanických parametrů betonu i oceli u prvků, u nichž existovalo na základě CFD simulace vývoje teplot a vizuální prohlídce objektu podezření o jejich poklesu v důsledku působení vysokých teplot.

ŽB konstrukce byly otestovány jednak in-situ informativní tvrdoměrnou zkouškou Schmidovým kladívkem a dále destruktivně laboratorní zkouškou tlakové pevnosti na odebraných vývrtech ze stropní desky a stěn. Reziduální mez kluzu ocelových konstrukcí byla otestována na odebraných vzorcích tahovou zkouškou.

Výsledky tvrdoměrné zkoušky ukázaly na lokální poklesy pevnosti betonu v povrchových vrstvách úměrně vzdálenosti zkoušeného místa od hořáků a tedy míst s výskytem nejvyšších teplot. Výsledky destruktivní tlakové zkoušky (viz Obr. 7) víceméně kopírovaly trend tvrdoměrných zkoušek, zároveň však vliv poklesu pevnosti v důsledku poškození vysokými teplotami byl méně výrazný kvůli „zprůměrování“ nepoškozeným betonem. Výsledné pevnosti betonu kolísaly v rozptylu 10-30 % vůči referenčním pevnostem, zároveň však nejnižší hodnoty podkročily charakteristickou pevnost předepsanou projektem jen o jednotky procent.

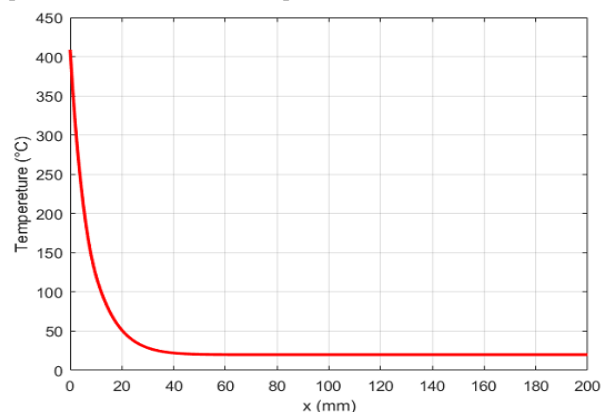


Obrázek 7: Destruktivní zkouška tlakové pevnosti betonového vývrhu odebraného ze stěny OD (Procházka a kol., 2019).

Provedené tahové zkoušky oceli odebrané z IPE nosníků zastropení 1.NP ukázaly mírné poklesy meze kluzu zkušebních tělísek vůči referenčním výsledkům, zároveň se ale všechny platné výsledky pohybovaly poměrně vysoko nad charakteristickou mezí kluzu předepsanou projektem.

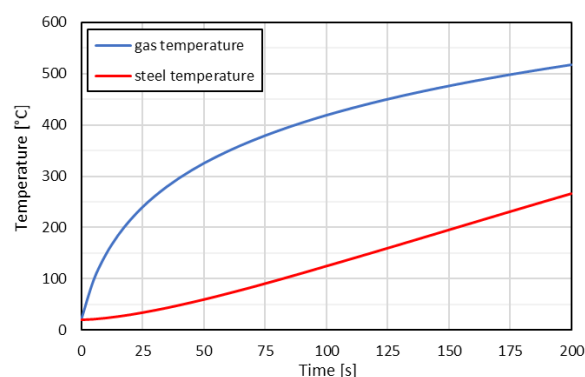
### 3.4. Teplotní analýza

Na základě provedené CFD simulace byly sestaveny křivky povrchových teplot ŽB konstrukcí v závislosti na čase, které byly použity jako vstupní parametr do výpočtu vedení tepla ŽB desky a stěn (výpočet proveden v programu TempAnalysis (Štefan, 2009)). Na Obr. 8 je uveden vypočtený teplotní profil obvodové stěny 1.NP v rohové části garáže v místě největší koncentrace vysokých teplot. Z něj je patrné, že povrch stěny vykazuje maximální teplotu cca 400 °C. Za předpokladu, že k poklesu pevnosti betonu dochází po překročení 100 °C lze konstatovat, že u dané stěny je teplotně poškozena pouze povrchová vrstva o tloušťce přibližně 10 mm.



Obrázek 8: Teplotní profil nejvíce zahříváné stěny v garáži 1.NP (Procházka a kol., 2019).

Na základě vývoje teploty plynů získaných z CFD simulace v pohledu pravého traktu 1.NP byl dále v prostředí MS Excel přírůstkovou metodou vypočítán vývoj teploty ocelových prvků. Lze konstatovat, že v maximálním čase požární zkoušky je teplota rovna cca 250 °C. Graf vývoje teploty plynu a ocelových nosníků v daném prostoru je uveden na Obr. 9.



Obrázek 9: Vývoj teplot plynu a oceli v nevětraném podhledu 1.NP – pravý trakt (Procházka a kol., 2019).

#### 4. VYHODNOCENÍ DIAGNOSTIKY

Na základě provedené podrobné prohlídky objektu, CFD simulaci, materiálových zkoušek a teoretických výpočtů je možné konstatovat, že nosné konstrukce OD jsou působením vysokých teplot poškozeny jen lokálně a do poměrně malého rozsahu. Poklesy pevností betonu i meze kluzu oceli byly zaznamenány v rozsahu cca 10-30 % v porovnání s referenčními hodnotami, zároveň jsou však tyto jen o jednotky procent pod charakteristickými pevnostmi obou materiálů předepsaných v prováděcí projektové dokumentaci. Pokles únosnosti konstrukčních prvků se proto očekává pouze minimální. Vzhledem k vysokým rezervám v únosnosti a aktuální úrovni zatížení konstrukcí proto není třeba žádných konstrukčních úprav či zesílení.

Betonářská výztuž v ŽB konstrukcích se předpokládá nepoškozená. Na žádném místě není výztuž odhalena a tudíž přímo vystavena působení vysokých teplot. Dle provedené teplotní analýzy jednotlivých ŽB prvků bylo také zjištěno, že teplota v hloubce uložení výztuže nepřesahuje 100 °C a tudíž její pevnost (resp. mez kluzu) není redukována ani v „horkém“ ani v reziduálním stavu.

Výsledkem provedené diagnostiky jsou tak pouze dvě doporučení na konstrukční (resp. stavební) úpravy. Prvním z nich je doporučení na doplnění ocelového nosníku IPE 180 do stropu v pravém traktu 1.NP, čímž by došlo ke zdvojení nosníku, který přenáší zatížení od výměny lemuující otvor pro točité schodiště. Tento otvor byl do stropní konstrukce doděláván dodatečně a přetížení zmíněného nosníku nebylo adekvátně reflektováno. Zároveň se tento nosník při plném požadovaném užitém zatížení pohybuje na hranici únosnosti. Zmíněnou úpravou by jeho únosnost byla zdvojnásobena a stala se tudíž vyhovující.

Druhou úpravou je doporučení na opravu hydroizolace podlahy v pravém traktu 1.NP. Ukázalo se, že v rámci požární zkoušky se na podlaze příslušného podlaží vyskytuje po zásahu hasičů velké množství vody, které zřejmě poškozenou hydroizolaci prosakuje do stropní desky 1.PP a dále nadměrně širokými trhlinami, jak bylo dokumentováno na Obr. 4. To má obecně negativní vliv na trvanlivost konstrukce, neboť může způsobovat korozi ohybové výztuže.

Závěrem statického posudku bylo také konstatováno, že pro zajištění maximální trvanlivosti konstrukcí a minimalizaci případných konstrukčních poškození plynoucích z provozu OD je jednoznačně žádoucí, aby veškeré konstrukce vystavené působení vysokých teplot byly opatřeny ochrannými šablonami s provětrávanou mezerou. Toto opatření se týká především doposud neprovětrávaného podhledu v pravém traktu 1.NP.

#### 5. ZÁVĚR

Předmětem článku bylo popsání provedení statického posudku nosných konstrukcí „ohňového domu“, jež je v rámci svého provozu opakovaně vystavován působení vysokých teplot. Jelikož se jedná o vysoce odbornou a komplexní problematiku, při zpracování posudku bylo zapotřebí provést postupně vizuální prohlídku místa, zadání odběru vzorků, simulaci vývoje teplot, materiálové zkoušky a jejich vyhodnocení, výpočet reziduální únosnosti konstrukcí a závěrečná doporučení. Přestože se nejednalo o evidentně významně poškozenou konstrukci se statickými poruchami, spolupráce na vypracování posudku byla pro autora extrémně zajímavá a přínosná, především kvůli možnosti aplikace znalostí a dovedností získaných během doktorského studia.

#### PODĚKOVÁNÍ

Tento článek byl vytvořen v rámci finanční podpory Studentské grantové soutěže ČVUT, č. projektu SGS20/041/OHK1/1T/11. Dále by autor rád poděkoval svým školitelům a kolegovi Ing. Martinu Benýškovi za spolupráci na vypracování tohoto posudku.

#### Reference

- Procházka, J., Müller, P. & Benýšek, M. *Znalecký posudek nosných konstrukcí „ohňového domu“* (2019), Praha. Concrete Society. *Assessment, design and repair of fire-damaged concrete structures* (2008), Camberley.
- Štefan, R., Procházka, J. *TempAnalysis* (MKP program pro výpočet vedení tepla v betonových konstrukcích) (2009), Praha.
- ČSN EN 1991-1-2. *Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru* (2004), Český normalizační institut, Praha.
- Benýšek, M. *Různé přístupy k modelování požáru pro posouzení požární odolnosti konstrukcí* (2019). In 8th PhD Workshop of the Department of Concrete and Masonry Structures, Praha.
- Horová, K., Wald, F. *Tepelná a mechanická zatížení konstrukcí při požáru* (2012). Dostupné online: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/8853-tepeln-a-mechanicka-zatizeni-konstrukci-pri-pozaru>.