

**sborník 7. studentské
vědecké konference**

Zapálení2024

Fakulta stavební | 4.–5. 6. 2023
ČVUT v Praze | pozar.fsv.cvut.cz

Za jazykovou a věcnou správnost obsahu díla odpovídají autoři.

Text neprošel redakční úpravou.

© kolektiv vedoucích předdiplomních prací:

**Pokorný, M., Mózer, V., Hejtmánek, P., Najmanová, H., Wald, F., Štefan, R., Pechová, P.,
Cábová, K., Velebil, L., Benýšek, M., Šejna, J., Jogi M., 2024**

ISBN 978-80-01-07311-7

PŘEDMLUVA

Sedmý ročník konference Zapálení2024 pořádaný dne 4. a 5. června 2024 na Fakultě stavební ČVUT v Praze je zaměřen na aktuální poznatky v oboru požárního inženýrství a bezpečnosti staveb. Záměrem konference je vytvořit místo pro setkání a diskuzi Zapálených – studentů, pedagogů i praktiků.

Prostor pro aktivní účast na konferenci dostávají naši nejstarší magisterští studenti 5. ročníku programu (Q) Integrální bezpečnost staveb, kteří budou prezentovat výsledky své předdiplomní přípravy formou přednášky a odborného článku. Konference je rozdělena do tří odborných sekcí, a to (A) Požární bezpečnost staveb, (B) Navrhování konstrukcí za požáru a (C) Aktivní požární ochrana.

Na konferenci jsou zváni všichni pro požární obor Zapálení! Z řad studentů jsou zváni zejména naši mladší studenti 3. a 4. ročníku bakalářské specializace (Q) Požární bezpečnost staveb, ale i studenti ostatních specializací. Studentům bude dán prostor se vzájemně seznámit a poznat možnosti svého budoucího zaměření na našem magisterském studiu. Z řad pedagogů jsou zváni zejména vedoucí před-diplomních prací a vyučující na „Qéčku“, kteří tak budou mít možnost sledovat zadávaná témata jiných kateder a zároveň mít možnost studentům poradit. Z řad praktiků jsou zváni zástupci Hasičského záchranného sboru ČR, absolventi „Qéčka“ a firmy z oboru.

Z odborných článků vzniká tištěný sborník, který je dispozici rovněž elektronické podobě na oborových webových stránkách <http://pozar.fsv.cvut.cz/>.

Diskutovaná témata jednotlivých autorů budou v následujícím semestru předmětem diplomových prací, které lze po úspěšné obhajobě dohledat na univerzitních webových stránkách <https://dspace.cvut.cz/>.

Studentská vědecká konference Zapálení2024 vznikla za podpory interního projektu SVK č. 04/24/F1 na ČVUT v Praze pro rok 2024. Zapálení tímto srdečně děkuje!

kolektiv vedoucích předdiplomních prací

OBSAH

Předmluva.....	2
Obsah.....	4
Table of Contents	5

SEKCE A | POŽÁRNÍ BEZPEČNOST STAVEB

HLAVATÁ T. Vliv požárního pásu na šíření požáru po fasádě	9
ANDRLE M. Degradace obkladů ze sádkokartonových desek za požáru	13
ZBOŽEK P. Požární bezpečnost větraných fasád	17
PAVLASOVÁ M. Automatizace výpočtů a vizualizace dostupného bezpečného času pro evakuaci ASET	21
KOŠÍK D. Experimentální zjišťování dat pro modelování dynamiky osob a evakuace	25

SEKCE B | NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ ZA POŽÁRU

KORANDA J. Stanovení vlivu externí kompozitní výztuže na odolnost železobetonových prizmatických prvků vůči vysokým teplotám	31
KRÁSLOVÁ K. Požární řešení skladových objektů	35
BIELA K. Řešení betonových základů pod silem v rámci protivýbuchové ochrany	39
TEPLÁ A. Teplotní analýza ostění tunelových staveb	43
MOUCHA P. Požární bezpečnost silničních tunelů se zaměřením na větrání	47
MIKLAS M. Rozvoj kouře a evakuace při požáru v železničním tunelu	51
BECK T. Modelování putujícího požáru a jeho vliv na odhořívání dřeva	55
VITENROVÁ S. Částečně požárně chráněný ocelový nosník	59
RUŠAROVÁ S. Rychlosti zuhelnatění dřeva se zohledněním vlivu vývoje trhlin: numerické řešení s využitím pravděpodobnostních postupů	63
SMETANOVÁ A. Křížem vrstvené dřevo za požáru	67

SEKCE C | AKTIVNÍ POŽÁRNÍ OCHRANA

TARR P. Výstřikové charakteristiky sprinklerových hlavice	73
TOMEŠ D. Testování speciálního druhu sprinklerové hlavice	77

TABLE OF CONTENTS

SECTION A | FIRE SAFETY OF BUILDINGS

HLAVATÁ T. The Influence of the Fire Barrier on Fire Spread across the Façade	9
ANDRL M. Degradation of Plasterboard Cladding in Fire.....	13
ZBOŽEK P. Fire Safety of Ventilated Facades.....	17
PAVALASOVÁ M. Automation of Calculations and Visualization of Available Safe Evacuation Time ASET.....	21
KOŠÍK D. Experimental data acquisition for modelling pedestrian and evacuation dynamics.....	25

SECTION B | STRUCTURAL DESIGN IN FIRE

KORANDA J. Determination of the Effect of External Composite Reinforcement on the High Temperature Resistance of Reinforced Concrete Prismatic Elements	31
KRÁSLOVÁ K. Fire Solutions of Warehouse Buildings	35
BIELA K. Solution of Concrete Foundations under Silos within Explosion Protection	39
TEPLÁ A. Temperature analysis of tunnel lining structures	43
MOUCHA P. Fire Safety of Road Tunnels with a Focus on Ventilation	47
MIKLAS M. Development of a Smoke and Evacuation in Case of a Fire in a Railway Tunnel	51
BECK T. Modelling of Travelling Fire and its Effect on Burning of Timber	55
VITNEROVÁ S. Partially Fire Protected Steel Beam	59
RUŠAROVÁ S. Charring Rates of Wood Considering the Effect of Crack Development: Numerical Solution Using Probabilistic Procedures	63
SMETANOVÁ A. Cross Laminated Timber Under Fire	67

SECTION C | ACTIVE FIRE PROTECTION

TARR P. Spray Characteristics of Sprinkler Heads	73
TOMEŠ D. Testing a Special Type of Sprinkler Head	77

VLIV POŽÁRNÍHO PÁSU NA ŠÍŘENÍ POŽÁRU PO FASÁDĚ**THE INFLUENCE OF THE FIRE BARRIER ON FIRE SPREAD ACROSS THE FAÇADE****Bc. Tereza Hlavatá****Abstract**

This article addresses the issue of fire barriers, their properties, and characteristics. To better understand the requirements for fire barriers, a theoretical study on the spread of fire across facades was first conducted. The goal of the research is to create an FDS mathematical model to simulate the occurrence of a fire and its transfer across an inert fire barrier. The results of this model will subsequently be used for a fire experiment, during which the composition of a fire barrier suitable for future application in timber buildings will be proposed.

Key words: fire barriers; fire spread; façade; fire; lining

ÚVOD

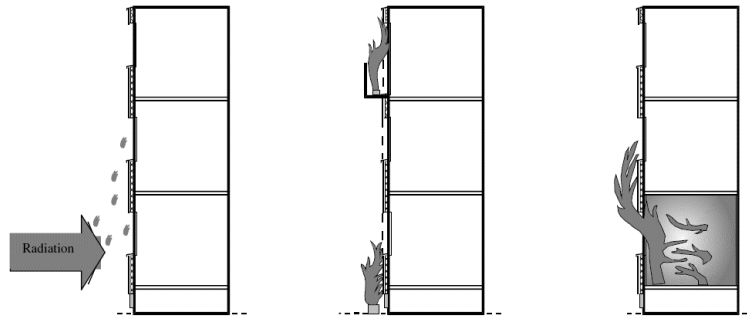
I přes materiálové a projekční pokroky v oblasti požární ochrany se stále ve velkém množství setkáváme s objekty, kde dochází k rozšíření vzniklých požárů přes fasádu a následnému přestupu do sousedních požárních úseků. V rámci požární bezpečnosti staveb jsou pro omezení těchto případů navrhovány požární pásy, které tvoří jednu z nejdůležitějších prvků požární ochrany. Zkoumání a implementace inovativních konstrukčních řešení požárních pásů může výrazně zvýšit odolnost budovy vůči požáru. V současné době jsou požární pásy, ve stávajícím konstrukčním řešení, požadovány v objektech s požární výškou nad 12,0 m. Musí být provedeny z konstrukcí druhu DP1 a zároveň povrchová úprava musí být nehořlavá, což může limitovat architektonický výraz budovy.

TEORIE ŠÍŘENÍ POŽÁRU PO FASÁDÁCH

Dříve fasády obsahovaly nehořlavé materiály jako cihly nebo betonové povrchy, což výrazně omezovalo šíření požáru po fasádách. Současné požadavky na snížení tepelných ztrát vedly k instalaci tepelné izolace tloušťky až 300 mm, často z hořlavých materiálů, což zvyšuje riziko šíření požáru. V případě šíření požáru po fasádě lze popsat 3 případy působení na fasádu (viz obr. 1). [1]

V prvním případě je povrch fasády vystaven především účinkům tepelné radiace, kdy intenzita sálání je závislá především na velikosti požáru, na odstupové vzdálenosti mezi sousedními budovami a jejich vzájemné poloze. V druhém případě je uvažován vliv požáru od např. kontejneru na odpad či zaparkovaného vozidla. Bez ohledu na hořlavost materiálů na fasádě objektu může dojít k přestupu do objektu v případě vystavení požárně otevřených ploch požáru po delší dobu. Za poslední a zároveň nejkritičtější scénář lze považovat požár v budově, kdy po momentu „flashover“ dochází k rozlomení okenní tabule a nastává ventilování plamenů z okna na fasádu objektu.

Při šíření požáru nedochází pouze k jeho postupování směrem vzhůru, ale také směrem dolů a do stran. Při vertikálním šíření dochází, kromě putování po fasádě, také ke Coandovu efektu. [3] Jedná se o tendenci tryskajícího proudu tekutiny přilnout k sousední rovině nebo konvexnímu povrchu. Kombinací větru, konvekce a tlaků v požárním úseku dochází k ovlivnění kouře a plynů tak, že po úniku z vnitřních prostor se šíří vertikálně do výšky. V důsledku působení podtlaku dojde k přilnutí tekutiny zpět na fasádu a její další účasti při šíření požáru na fasádě. K vertikálnímu šíření přispívá použití provětrávané fasády. V současné době se šířka provětrávané dutiny ve fasádách pohybuje v rozmezí 30–100 mm. Dle již dříve provedených experimentů bylo prokázáno, že šířka dutiny má přímý vliv na výšku plamenů, které se nacházejí uvnitř dutiny. Jedná se zde o nepřímou úměrnost, kdy se zmenšující se šířkou dutiny dochází k vyšším plamenům uvnitř. [2] Zásadním vlivem na šíření požáru po fasádě je hořlavost použitých materiálů, ať už se jedná o tepelné izolace či použitých obkladů.



Obr. 1 Případy působení požáru na vnější stěny [1]

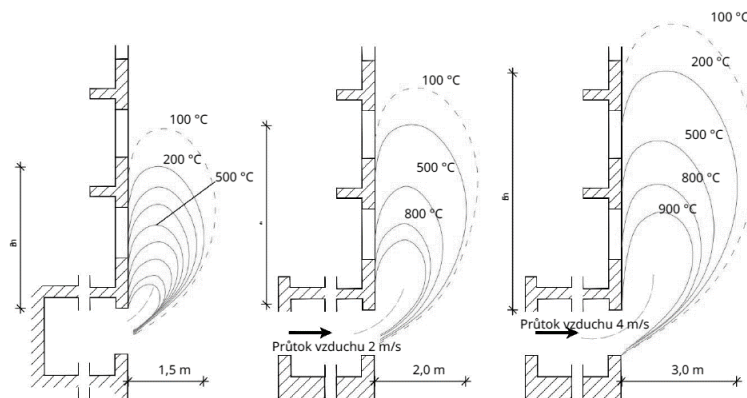
Fig. 1 Cases of fire impact on external walls [1]

Na šíření požáru mají značný podíl i povětrnostní podmínky, u kterých záleží na rychlosti a směru větru. Při kolmém působení větru dochází ke zpomalení vertikálního šíření ohně a zvyšuje se boční šíření podél návětrného povrchu. V případě bočního větru dochází k výraznému ovlivnění vertikálního a celkového šíření požáru ve srovnání s případem bezvětří.

Shodné vlivy ovlivňují také boční šíření. Jedná se o menší rozsah působení, ale stejně zásadní jako v případě vertikálního působení. K šíření směrem dolů dochází při krátkodobém vznícení vytékajících roztavených či zplyněných částí hořlavé tepelné izolace.

POŽÁRNÍ PÁS DLE ČESKÉ LEGISLATIVY

Pro zabránění šíření požáru vnějším prostředím na přilehlé požární úseky je navrhován požární pás. Jedná se o stabilní konstrukci, která musí být provedena z nehořlavých materiálů. Dále nesmí obsahovat žádné požárně otevřené plochy a nesmí jí procházet konstrukce z hořlavých materiálů. Požární odolnost konstrukce požárního pásu je stanovena na základě vyššího stupně požární bezpečnosti dvou sousedních požárních úseků v objektu. Dle české legislativy je nutný návrh požárních pásů v objektech, jejichž požární výška je vyšší než 12,0 m. [4, 5]



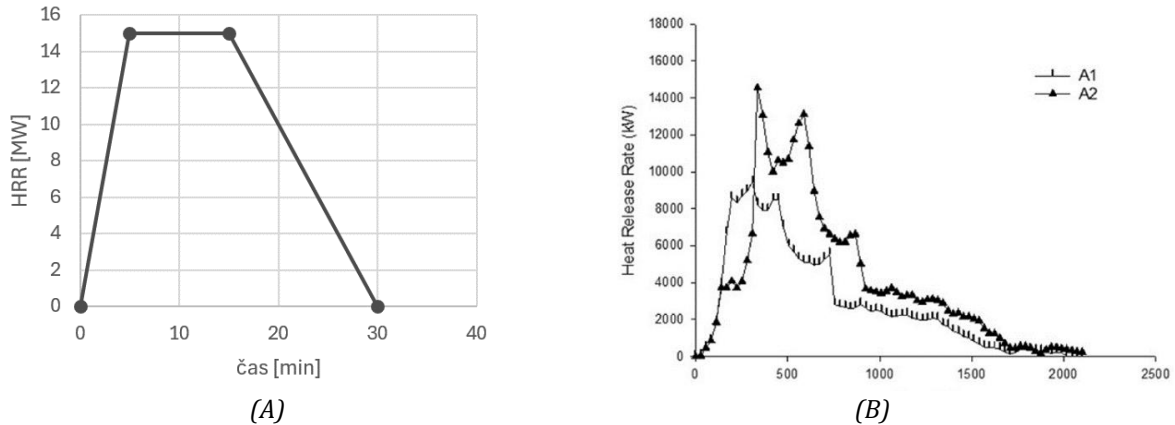
Obr. 2 Izotermy před fasádou [1]

Fig. 2 Isotherms in front of the façade [1]

Požární pásy mohou být instalovány ve svislém i vodorovném provedení. V obou případech je minimální šířka dle českých technických norem 900 mm. I přesto, že tok horkých a hořlavých plynů, k jejichž oxidaci nebyl dostatek kyslíku v hořícím prostoru, vytváří tepelné pole, jehož teplota dosahuje i několika set stupňů Celsia (viz obr. 2). Pro dostatečné zabránění přestupu požáru by bylo potřeba větších rozměrů, které by však do architektonického řešení zasahovaly mnohem více. Krom přímého požárního pásu výšky (šířky) 900 mm existují ještě různé konstrukční varianty, nejčastěji jde o předsazenou konstrukci s požární odolností s rozvinutým obvodem min. 1200 mm. Od požárního pásu lze upustit, pokud jde o požární úsek bez požárního rizika šířky minimálně 1500 mm, popřípadě pokud jde o požární úsek vybavený SSHZ. [1]

NUMERICKÉ OVĚŘENÍ FUNKCE POŽÁRNÍHO PÁSU

Pro posouzení požárních pásů při požární zkoušce byl vytvořen matematický model v programu FDS (Fire Dynamics Simulator) verze 6.9.1. Základní informace o zdroji požáru jsou převzaty z publikovaných dat a informací z dříve provedených zkoušek, konkrétně byly použity výsledky z turecké studie [6]. Tato studie se zaměřila na charakteristiku požárního zatížení a šíření požáru v moderních výškových budovách. Průzkum byl prováděn v obytných prostorách, ložnicích a kuchyních v 50 výškových budovách v Istanbulu. Pro model byla použita maximální rychlost uvolňování 14 MW (viz obr. 3A, 3B), která dle studie simuluje požár v obytné místnosti s průměrným požárním zatížením 310–379 MJ/m².



Obr. 3 (A) Graf použité křivky HRR; (B) Křivka HRR podle [6]
 Fig. 3 (A) Graph of the applied HRR curve; (B) HRR curve by [6]

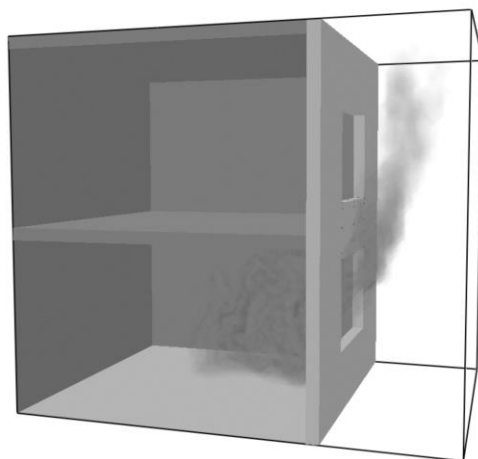
Geometrie modelu je navržena jako dvě místnosti nad sebou, které simulují dva sousedící požární úseky. Stropní konstrukce je uvažována s požární odolností, aby bylo zanedbáno prostup požáru skrz. V obvodových stěnách jsou umístěny otevřené plochy, mezi kterými je vzdálenost 900 mm. Jedná se o minimální výšku požárního pásu dle českých technických norem. Půdorysné rozměry navržených místností jsou 5 x 5 m se světlou výškou 2,8 m (viz obr. 4). Pro získání referenčních hodnot pro validaci požární zkoušky jsou požárním pásu umístěné termočlánky měřící teplotu povrchu konstrukce a termočlánky pro určení teploty vzduchu.

KRITÉRIA POŽÁRNÍHO PÁSU

Aby konstrukce mohla být využita jako požární pás, je nutné, aby splňovala určitá kritéria, která zpomalí rozšíření požáru do sousedního požárního úseku. Prvním z těchto kritérií je dodržení materiálových vlastností konstrukce, jako je nulový index šíření plamene po povrchu. Dále je nutné zaručení teploty prvků pod kritickou hodnotou, zejména se jedná o statické prvky, které zajišťují stabilitu požárního pásu. Dalším kritériem je dodržení mezního stavu EI, který by měl požární pás splňovat. Jedná se o mezní stav, kdy nebude narušena celistvost prvku a zároveň nedojde k vystoupaní průměrné teploty na neohřívané straně o více než 140 °C, nebo nedojde k maximálnímu bodovému vzrůstu teploty v jakémkoliv místě o více než 180 °C.

NAMĚŘENÉ HODNOTY

V rámci matematického modelu byly získány hodnoty pro inertní požární pás, které slouží pro ověření kritérií popsanych výše. Konkrétně je hodnocen mezní stav EI, kdy byl zjištěn průměrný nárůst teplot na odvrácené straně konstrukce 159,06 °C. Maximálního bodového vzrůstu o 180 °C bylo dosaženo v čase 7,4 min. Během této doby došlo k průměrnému nárůstu teploty o maximálně 50 °C.



Obr. 4 Grafický výstup z programu Pyrosim
Fig. 4 Graphic output from Pyrosim program

ZÁVĚR

Cílem článku bylo vypracování matematického modelu v programu FDS, za účelem porovnání získaných výsledků se současnými návrhovými kritérii pro požární pásy. Vzhledem k velikosti plamenů šlehajících z oken při plně rozvinutém požáru (Obr. 2) je nasnadě, že požární pás nemá šanci šíření požáru zastavit. Požární pás má zajistit zpomalení šíření požáru z požárního úseku do druhého a má za cíl eliminovat šíření plamene po fasádě. Dle matematického modelu bylo zjištěno, že požární pás ve svém minimálním rozměru selhává po 7. minutě.

PODĚKOVÁNÍ

Článek vznikl v rámci projektu „LUC23080 – Pokročilé návrhové postupy pro klíčové prvky vícepodlažních dřevostaveb“, který byl podpořen Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy z programu podpory mezinárodní spolupráce ve výzkumu, vývoji a inovacích INTER-EXCELLENCE II.

LITERATURA

- [1] KOTTHOFF a RIEMESCH-SPEER - 2013 - *Mechanism of fire spread on facades and the new Te.pdf* [online]. [vid. 2024-03-16]. Dostupné z: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2013/07/mateconf_isfsf13_02010.pdf.
- [2] BURIAN, M. *Analýza chování účinku požáru ve větrané dutině u fasádních systémů* [online]. 2022 [vid. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/99651>.
- [3] SREMEC, D. (2019). *Zaštita od požara fasada kod višekatnih zgrada* (Diplomski rad). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet. Dostupné z: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:220373>.
- [4] REICHEL, V. *Navrhování požární bezpečnosti staveb*. Praha: Nakladatelství techn. lit, 1980.
- [5] ČSN 73 0802 ed. 2 *Požární bezpečnost staveb – nevýrobní objekty* [online]. B. m.: Česká agentura pro standardizaci. říjen 2020. Dostupné z: <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/>.
- [6] DUNDAR, U. a SELAMET S. *Fire load and fire growth characteristics in modern high-rise buildings*. *Fire Safety Journal* [online]. 2023, 135, 103710. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2022.103710.

DEGRADACE OBKLADŮ ZE SÁDROKARTONOVÝCH DESEK ZA POŽÁRU DEGRADATION OF PLASTERBOARD CLADDING IN FIRE

Bc. Martin Andrlé

Abstract

This article investigates the principles of fire investigation and the analysis of the degradation of gypsum plasterboard in fire conditions. This article is divided into two sections. This first part of the article focuses on fire investigation, calcination of plasterboard and types of gypsum plasterboard according to ČSN EN 520+A1. The second part of the article is focused on the description of a small test furnace (miniFUR) with newly added burners. Subsequently, the test samples are presented, which will be burned for the experimental part, and their depth of calcination was examined.

Key words: Gypsum board; depth of calcination; fire effect; small test furnace; fire investigations

ÚVOD

Při požáru v objektu, pokud nejsou svědci nebo není požár nahlášen prostřednictvím požárně bezpečnostního zařízení, je nutné, aby požární vyšetřovatel určil místo vzniku požáru pozorováním a odborným vyhodnocením na základě fyzikálních důkazů. U sádrokartonových konstrukcí je při zjišťování příčiny požáru klíčová hloubka kalcinace. Místo, kde s největší pravděpodobností došlo ke vzniku požáru, lze určit podle nejhlubší vrstvy kalcinace.

POŽÁRNÍ VYŠETŘOVÁNÍ

Po požáru je klíčové zjistit jeho příčinu, což má význam pro veřejnost i majitele postiženého objektu. Proto je důležité, aby požární vyšetřovatelé, odborníci ve svém oboru, převzali kontrolu po požáru a objektivně posoudili místo události. V USA je k dispozici norma National Fire Protection Association (NFPA) 921 – Průvodce pro vyšetřování požárů a výbuchů, která poskytuje směrnice a postupy pro provádění forenzních vyšetřování požárů a výbuchů [1].

V České republice se požární vyšetřování nazývá zjišťování příčin vzniku požáru (ZPP). Tuto činnost řídí státní požární dozor (SPD), a vykonává ji pouze hasičský záchranný sbor (HZS) kraje. Vyšetřovatel na požářišti lokalizuje vznik požáru, zkoumá porušení předpisů, a dokumentuje to fotografiemi a audiovizuálně. V případě, že je potřeba detailnější analýza obrátí se na Technický ústav požární ochrany (TÚPO). Vyšetřovatel získané informace o požáru zaznamenává a vkládá je do Statistického sledování událostí (SSU). Výsledky vyšetřování jsou důležité pro likvidaci pojistných událostí a další opatření. [2].

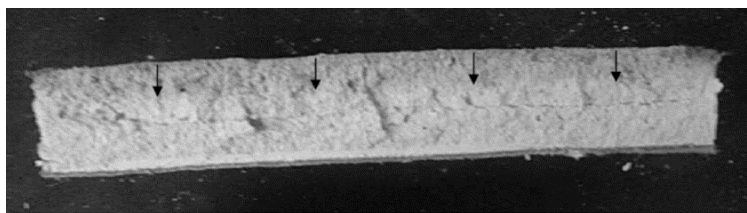
KALCINACE SÁDROKARTONU

Je účinek požáru, který se projevuje u sádrových výrobků, případně celých stěn ze sádrokartonových desek v důsledku tepelné expozice, která zapříčiňuje odpařování volné a chemicky vázané vody lze se setkat i s pojmenováním dehydratace sádrokartonu.

Kalcinace sádry zahrnuje fyzikálně-chemickou přeměnu na jiný minerál konkrétně anhydrit. Kalcinované sádrokartonové desky mají menší objemovou hmotnost než nekalcinované desky. Čím je hloubka kalcinační vrstvy hlubší, tím lze říci, že prvek byl vystaven větší tepelné expozici po delší časový horizont [3]. Na obrázku 1 lze vidět kalcinovanou vrstvu.

TYPY SÁDROKARTONOVÝCH DESEK

V roce 2005 byly přijata evropská norma s označením ČSN EN 520+A1, která uvádí definice, požadavky a zkušební metody pro SDK desky. V tabulce 1 jsou zmíněny druhy SDK desek.



Obr.1 Řez sádrokartonovou deskou s viditelnou hloubkou kalcinační vrstvy [4]
 Fig.1 Cut through a gypsum plasterboard with visible depth of the calcination [4]

Tab. 1 Druhy sádrokartonových desek podle ČSN EN 520+A1 [5]

Tab. 1 Types of gypsum plasterboards according to ČSN EN 520+A1 [5]

Typ	Název
A	sádrokartonová stěnová deska
H	sádrokartonová stěnová deska se sníženou absorpcí vody
E	sádrokartonová plášťová deska
F	sádrokartonová stěnová deska se zvýšenou pevností jádra při vysokých teplotách
P	sádrokartonová deska
D	Sádrokartonová deska s kontrolovanou objemovou hmotností
R	sádrokartonová deska se zvýšenou pevností
I	sádrokartonová deska se zvýšenou tvrdostí povrchu

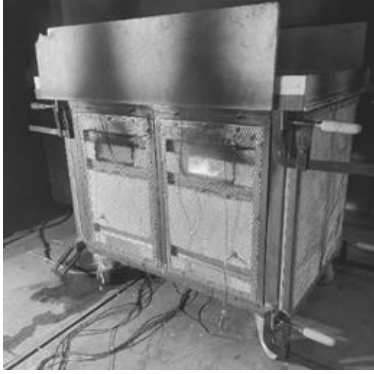
ZKUŠEBNÍ PEC MINIFUR

Zkušební pec miniFUR (viz obrázek 2) je umístěna v laboratoři FireLAB na UCEEBU ČVUT v Buštěhradu. Zkušební pec slouží k předběžným středně rozměrovým zkouškám požární odolnosti stavebních konstrukcí jedná se zejména o stěny, stropy, střechy. Pec je tvořena demontovatelným pohyblivým boxem na kolečkách o vnitřní proporcích 1,2 m × 0,8 m × 0,8 m. Strop boxu a obě jeho čelní strany lze současně nahradit zkušebními vzorky nebo je možnost testované vzorky umístit rovněž dovnitř prostoru pece. Pec má k dispozici boční otvory, které se nacházejí v nedemontovatelných stranách a umožňují přirozený přívod vzduchu během procesu spalování a odvod spalin ze spalování. Samotný požár v peci miniFUR je zajištěn pomocí plynového hořáku. Pro měření teplot v peci je umístěno osm plášťových termočlánků (viz obrázek 3). První čtveřice je umístěna ve výškové úrovni 0,25 m nad podlahou pece. Druhá čtveřice termočlánků je umístěna ve výškové úrovni 0,7 m nad podlahou pece.

OPTIMALIZACE HOŘÁKŮ

V rámci experimentu bylo navázáno na předchozí diplomovou práci [6], v ní se upravovaly hořáky u pece, aby docházelo k dostatečnému promíchávání horkých plynů v celkovém objemu pece. Optimalizace vytvořených hořáků (viz obrázek 4) spočívala v tom, že konstrukce hořáků byla sestavena i z druhé strany pece. Vyměnily se ventily pro pilotní hořáky a obě konstrukce hořáků byly zajištěny dvěma závitovými tyčemi. Pozice plášťových termočlánků v půdorysu, které snímaly teplotu uvnitř pece je možno vidět na obrázku 5.

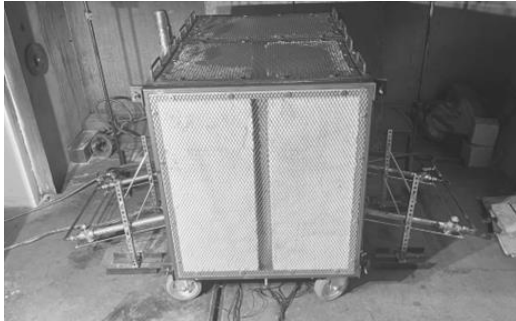
Následně proběhly tři zkušební testy hořáků po dobu 30 minut. Na obrázcích 5 až 7 lze vidět rozložení teplot v peci u termočlánků (21-24) ve výškové úrovni 0,7 m nad podlahou.



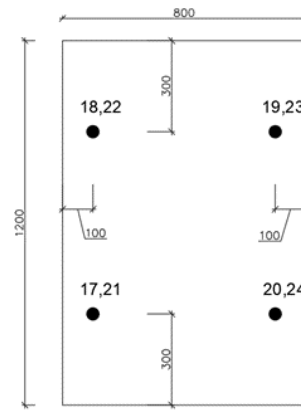
Obr. 2 Zkušební pec miniFUR [7]
Fig. 2 MINIFUR test furnace [7]



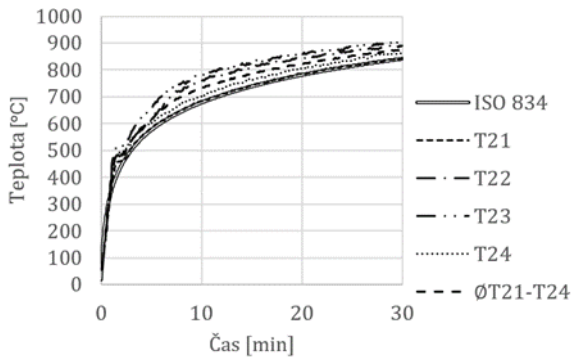
Obr. 3 Zkušební pec miniFUR s viditelným plynovým hořákem uprostřed [6]
Fig. 3 Test furnace miniFUR with a visible sand burner in the middle [6]



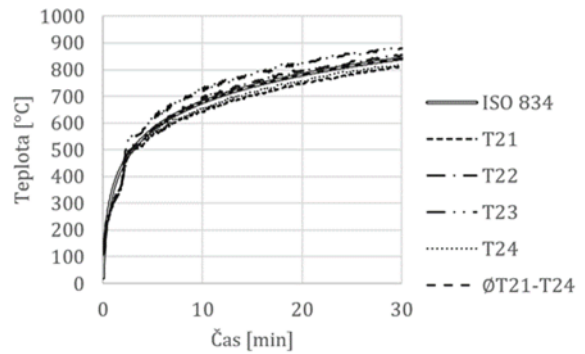
Obr. 4 Optimalizované hořáky
Fig. 4 Optimized burners



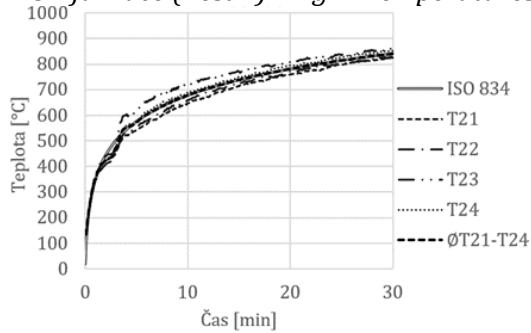
Obr. 5 Pozice termočlánků (17-24)
Fig. 5 Thermocouple positions (17-24)



Obr. 6 Rozložení teplot v peci miniFUR (Test 1)
Fig. 6 Temperatures in miniFUR furnace (Test 1)



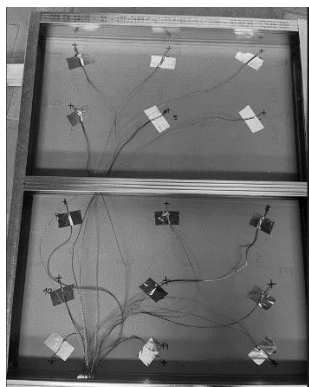
Obr. 7 Rozložení teplot v peci miniFUR (Test 2)
Fig. 7 Temperatures in minifur furnace (Test 2)



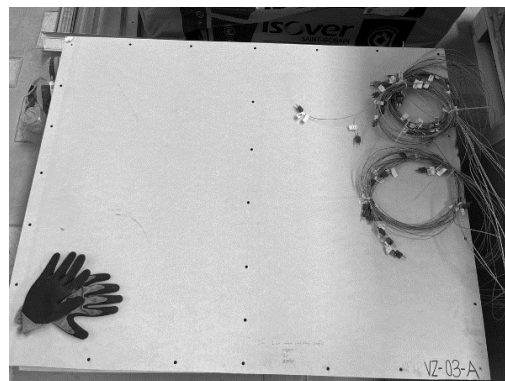
Obr. 8 Rozložení teplot v peci miniFUR (Test 3)
Fig. 8 Temperatures in MINIFUR furnace (Test 3)

ZKUŠEBNÍ VZORKY

Zkušební vzorky jsou rozměru 1000 x 1250 mm. Na vzorky je použita deska typu A a DEFH2IR s tloušťkou 12,5 mm. Do zkušební vzorku je umístěno 15 termočlánků. Na obrázku 9 je možno vidět rozmístění termočlánků a na obrázku 10 je možno vidět již sestavený vzorek.



Obr. 9 Umístění termočlánků 1-15
Fig. 9 Placement of thermocouples 1-15



Obr. 10 Sestavený vzorek
Fig. 10 Assembled sample

ZÁVĚR

Provedená úprava hořáků zajistila v peci lepší rozložení teplot uvnitř pece. Lze konstatovat, že tepelné namáhání uvnitř pece je rovnoměrné. Následně proběhne zkouška se sestavenými vzorky a poté na vzorcích změření hloubky kalcinace digitálním hloubkoměrem.

PODĚKOVÁNÍ

Experimentální část, která je prezentována v tomto článku, je součástí realizace projektu BV MV Inovace a rozvoj nástrojů v oblasti zjišťování příčin vzniku požárů VJ01010046.

LITERATURA

- [1] GORBETT, Gregory E, Brian J MEACHAM, Christopher B WOOD a Nicholas A DEMBSEY. Use of damage in fire investigation: a review of fire patterns analysis, research and future direction. *Fire Science Reviews* [online]. 2015, 4(1), 4 [vid. 2024-02-25]. ISSN 2193-0414. Dostupné z: doi:10.1186/s40038-015-0008-4
- [2] Popis fungování procesu státního požárního dozoru – zjišťování příčin vzniku požárů – Hasičský záchranný sbor České republiky [online]. [vid. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/popis-fungovani-procesu-statniho-pozarniho-doзору-zjistovani-pricin-vzniku-pozaru.aspx>
- [3] CHARLES R. WATSON a CHRISTOPHER B. WOOD. NFPA 921 Guide for Fire and Explosion Investigations. B.m.: National Fire Protection Association. 2016
- [4] NGU, Chu Nguong. Calcination of Gypsum Plasterboard under Fire Exposure [online]. 2004 [vid. 2024-02-25]. Dostupné z: doi:10.26021/1689
- [5] ČSN EN 520+A1 Sádkokartonové desky – Definice, požadavky a zkušební metody. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. březen 2010
- [6] ANDRLÍK, Milan. Posuzování požárem namáhaných konstrukcí [online]. Praha, 2024. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/113962/F1-DP-2024-Andrlik-Milan-DP_Milan_Andrlik_2024.pdf?sequence=-1&isAllowed=y
- [7] Nabízíme- [online]. 27. říjen 2023 [vid. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://pozar.fsv.cvut.cz/wp-content/uploads/2023/11/FireLAB-UCEEB-MiniFUR-2.jpeg>

POŽÁRNÍ BEZPEČNOST VĚTRANÝCH FASÁD

FIRE SAFETY OF VENTILATED FACADES

Bc. Pavel Zbožek

Abstract

The facade is a key element in the appearance of any building and requires careful attention in design. With a wide choice of materials, ventilated facades have become a common feature of modern architecture and can positively influence the thermal performance of a building. However, they also pose a significant risk in the form of fire safety. It is essential to prevent the spread of fire along the façade and in the cavity of ventilated systems, which can be partly addressed by fire barriers. In the European Union, there is still no uniform methodology for fire testing and assessment.

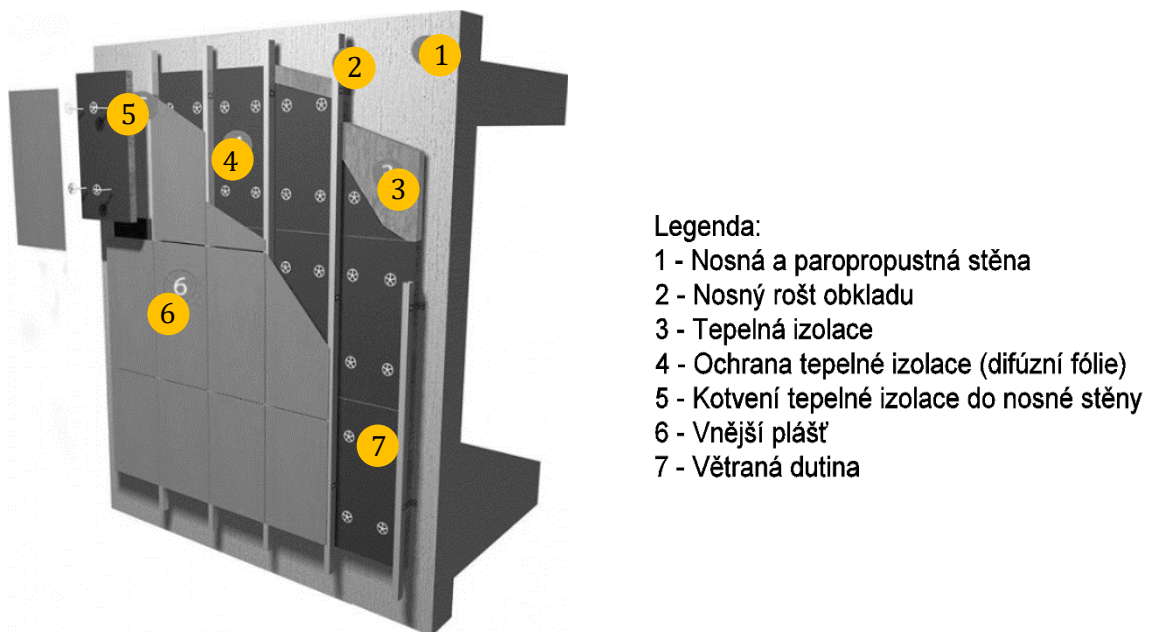
Key words: ventilated facade; risk analysis, fire, cavity, isolant

ÚVOD

Fasádní systém je neodmyslitelnou součástí každé stavby, přičemž hraje klíčovou roli v celkovém vzhledu budovy. Fasádní systém nejenže definuje architektonický vzhled, ale také chrání budovu před nepříznivými klimatickými vlivy a udržuje v interiéru příjemné tepelné prostředí.

Větraná fasáda se skládá z několika vrstev. Vnější plášť je přichycený na nosném roštu, který vytváří mezi pláštěm a tepelnou izolací větranou dutinu. Funkce pláště je ochrana fasády proti negativním vnějším účinkům. Tepelná izolace je kotvena pomocí hmoždinek, které jsou uchyceny přímo v nosném systému budovy. Pro ochranu tepelné izolace jsou používány různé druhy difúzních fólií nebo membrány, obr. 1. Pod nosný rošt je přidávána podložka, přerušující tepelný most.

Stávající legislativa nedokáže efektivně reagovat na širokou škálou konstrukčních a materiálových variant větraných fasádních systémů, oproti materiálově a technologicky jednoduššímu kontaktnímu zateplovacímu systému (ETICS). Tato situace je dále zkomplikována různými přístupy v zkušebních metodikách v evropských státech, avšak v současné době švédský institut RISE (Research Institutes of Sweden) pracuje na vytvoření jednotné metodiky zkoušek [1].



Obr. 1 Konstrukční princip provětrávané fasády [2]
 Fig. 1 Design principle of the ventilated facade [2]

POŽÁRNÍ RIZIKA

Požární riziko lze rozdělit do různých skupin ohrožení. První variantou je vnější požár, kdy může dojít z exteriéru k přeskočení plamene na fasádu a možnému poškození vnějšího pláště, případně pronikání plamene do větrané dutiny. Druhou variantou je vnitřní požár, který vznikne v objektu. Takový požár dosahuje vysokých teplot a plameny se mohou snadno přes okenní výplně šířit do větrané dutiny, případně se požár rozšiřuje přes hořlavý vnější plášť [3].

V důsledku požárů budov jsou ročně hlášeny tisíce lidských životů a značné ekonomické ztráty. Požár výškové budovy Grenfell Tower v Londýně je jedním z nejzávažnějších požárů. Požár vznikl v 4. NP a začal se rychle šířit přes větranou dutinu fasády, která byla tvořená z PIR desek (třída reakce na oheň B-C) s kombinací hořlavých obkladových desek (třída reakce na oheň E-F), obr. 2 (A). Dalším případem může být nedávný požár bytového komplexu ve Valencii, kde byl také na fasádě použit hořlavý obklad, obr. 2 (B).



(A)



(B)

Obr. 2 (A) Požár Grenfell Tower v Londýně [4]; (B) Požár bytového komplexu ve Valencii [5]
Fig. 2 (A) Grenfell Tower fire in London [4]; (B) Fire in an apartment complex in Valencia [5]

ANALÝZA RIZIKA PŘÍSPĚVKU DÍLČÍCH PRVKŮ VĚTRANÉ FASÁDY K ROZVOJI POŽÁRU

Jak již bylo zmíněno, v současné době jsou na trhu různé materiálové a konstrukční prvky. Následující analýza se zaměřuje na dílčí prvky větrané fasády, které mohou přispět k rozvoji požáru. To zahrnuje izolační materiály, obklady, kotevní rošty a další součásti fasády. Cílem je posouzení dílčích prvků a stanovení výsledného hodnoty rizika rozvoje požáru. Byly vytvořeny 3 hlediska, které představují jednotlivá kritéria a jejich váhy.

První kritérium vyjadřuje rozvoj požáru v závislosti na třídě reakce na oheň. Reakce na oheň stanovuje, jak výrobky přispívají svou hořlavostí k rozvoji a intenzitě možného požáru. Čím vyšší váha, tím víc prvek přispívá k rozvoji požáru na fasádě viz tab. 1.

Tab. 1 Kritérium rozvoje požáru a jednotlivé váhy odpovídající třídě reakce na oheň

Tab. 1 Fire development criterion and individual weights corresponding to the reaction to fire class

Kritérium R (rozvoj požáru, v závorce uvedena třída reakce na oheň prvku)	Váha
Zanedbatelné: nepřispívají k šíření požáru a k vývoji kouře (A1/A2)	1
Nízké: velmi omezeně přispívají k šíření požáru a k vývoji kouře (B)	2
Střední: omezeně přispívají k šíření požáru a k vývoji kouře (C)	3
Vysoké: přispívají k šíření požáru a k vývoji kouře (D)	4
Velmi vysoké: výrazně přispívají k šíření požáru a k vývoji kouře (E/F)	5

Druhé kritérium vyjadřuje četnost jednotlivých prvků ve skladbě větrané fasády. Nízká četnost představuje zanedbatelný výskyt prvků v konstrukci fasády. Příkladem mohou být např. podložky pod kotvami nosného roštu, které přerušují tepelný most nebo kotevní prvky tepelné izolace. Zástupci střední četnosti mohou být např. nosné rošty nebo difúzní fólie, která chrání tepelnou izolaci. Vysoká četnost představuje důležité prvky větrané fasády, které v konstrukci dominují, např. obklady, tepelná izolace. Čím vyšší váha, tím je dílčí prvek více zastoupený v konstrukci viz tab. 2.

Tab. 2 Kritérium četnosti prvků v konstrukci a jednotlivé váhy

Tab. 2 Criterion of frequency of elements in the structure and individual weights

Kritérium Č (četnost zastoupení prvku)	Váha
Nízké: zanedbatelný výskyt v konstrukci	1
Střední: značný výskyt v konstrukci	2
Vysoké: převládající výskyt v konstrukci	3

Třetím kritériem je kritérium exponovanosti. Ve větrané fasádě, ale také u posuzování konstrukcí za požáru, je důležité, z jaké strany je konstrukce namáhána požárem. Proto kritérium exponovanosti vyjadřuje, zda je prvek vystaven požáru ze dvou stran, z jedné strany, nebo prvky nejsou přímo vystavené účinkům požáru, tj. jsou chráněny např. jinými vrstvami fasádního systému viz tab. 3.

Tab. 3 Kritérium exponovanosti a jednotlivé váhy

Tab. 3 Exposure criterion and individual weights

Kritérium E (exponovanost prvku)	Váha
Nízké: prvky nejsou přímo vytavené účinkům požáru	1
Střední: prvky jsou vytavené účinkům požáru z jedné strany	2
Vysoké: prvky jsou vytavené účinkům požáru ze dvou stran	3

Pro dílčí prvky jsou stanoveny 3 stupně rizika (nízké, střední a vysoké). Výsledná hodnota a procentuální vyčíslení je uvedeno v tab. 4.

Tab. 4 Vyhodnocení výsledné hodnoty rizika

Tab. 4 Evaluation of the resulting risk value

$V = R \times \check{C} \times E$ (výsledná hodnota rizika)	%	Míra rizika
1 ~ 9	0 ~ 20	nízké
10 ~ 22	21 ~ 49	střední
23 ~ 45	50 ~ 100	vysoké

Vyhodnocení rizik:

- Nízké riziko: hodnocený prvek nepřispívá k rozvoji požáru a představuje tak minimální hrozbu pro větrané fasády.
- Střední riziko: hodnocený prvek přispívá k rozvoji požáru, je potřeba dbát na zvýšenou opatrnost při návrhu větrané fasády.
- Vysoké riziko: hodnocený prvek představuje vysokou hrozbu pro větrané fasády, je potřeba navrhnout prvky omezující šíření požáru.

V tab. 5 jsou vypsané jednotlivé prvky větrané fasády, jejich materiály a třídy reakce na oheň. Výsledná hodnota rizika vzniká součinem jednotlivých hledisek.

Dle výsledné hodnoty rizika můžeme vidět, že se v konstrukci větrané fasády vyskytují i prvky, které přispívají k rozvoji požáru. Představují tak vysokou hrozbu pro větrané fasády. Naopak některé jiné prvky představují požární riziko jen omezeně. Proto je důležité dbát na správný návrh.

Tab. 5 Vyhodnocení rizika rozvoje požáru dílčích prvků větrané fasády

Tab. 5 Evaluation of the risk of fire development of partial elements of the ventilated façade

Prvek	Výrobek	Třída reakce na oheň	R (rozvoj požáru)	Č (četnost zastoupení)	E (exponovanost)	V (výsledná hodnota rizika)	
						$V = R * Č * E$	%
Tepelná izolace	Minerální vlna	A1	1	3	2	6	13
	PIR	E	5	3	2	30	67
	Fenolická pěna	C	3	3	2	18	40
	XPS / EPS	E	5	3	2	30	67
Ochrana tepelné izolace	Difúzní fólie z polyesterové fólie	E	5	2	2	20	44
	Membrána	B	2	2	2	8	18
Podložka pro přerušování tepelného mostu	Polyamid	E	5	1	1	5	11
Nosný rošt	Dřevo	D	4	2	2	16	36
	Kov	A1	1	2	2	4	9
Obklad	Kámen	A1	1	3	3	9	20
	Panel s polyetylenovým jádrem	C	3	3	3	27	60
	Sklolaminát	E	5	3	3	45	100

ZÁVĚR

Velkým problémem jsou nedostatečně stanovené legislativní požadavky pro větrané fasády, kdy nejsou jasně definované termíny a způsoby posouzení rizika šíření plamene a zplodin hoření. Vlivem širokého výběru materiálů a konstrukčního provedení, který se v současnosti ve větraných fasádách vyskytuje, představuje fasáda značné riziko.

Požární bezpečnost větraných fasád představuje komplexní výzvu, která vyžaduje zvýšenou pozornost. Implementace vhodných materiálů, požárních bariér a moderních technologií může výrazně snížit riziko požáru a zvýšit bezpečnost větraných fasád.

LITERATURA

- [1] European approach to assess the fire performance of facades | RISE. In: . 12. 3. 2020 [cit. 20.05.2024]. Dostupné z: <https://www.ri.se/en/what-we-do/projects/european-approach-to-assess-the-fire-performance-of-facades>
- [2] Odvetrana fasada – Automatisk gjennomgang. In: [cit. 20.05.2024]. Dostupné z: <http://struktura.lbmos.ru/odvetrana-fasada/>
- [3] GODAKANDAGE, Rajeendra, Pasindu WEERASINGHE, Kumari GAMAGE, Hani ADNAN a Kate NGUYEN. A Systematic Review on Cavity Fires in Buildings: Flame Spread Characteristics, Fire Risks, and Safety Measures. *Fire* [online]. 2023, 7(1), 12. ISSN 2571-6255. Dostupné z: doi:10.3390/fire7010012
- [4] Grenfell Tower fire. In: Wikipedia [online]. 2024 [cit. 20.05.2024]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Grenfell_Tower_fire&oldid=1225403675
- [5] Grenfell Tower fire. In: Wikipedia [online]. 2024 [cit. 20.05.2024]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Grenfell_Tower_fire&oldid=1225403675

AUTOMATIZACE VÝPOČTŮ A VIZUALIZACE DOSTUPNÉHO BEZPEČNÉHO ČASU PRO EVAKUACI ASET

AUTOMATION OF CALCULATIONS AND VISUALIZATION OF AVAILABLE SAFE EVACUATION TIME ASET

Bc. Markéta Pavlasová

Abstract

This article focuses on the problem of filling a room with smoke. In the theoretical part, it describes the different calculation methods, what they are based on and what input parameters are used. In the practical part it deals with the comparison of the different methods when the same input conditions are considered. The output data of this comparison will be further used in the parametric and sensitivity analysis and the automation of the calculations.

Key words: ASET; smoke layer; fire growth rate; fire dynamics; smoke filling.

ÚVOD

V současné době se návrhy požární bezpečnosti zakládají převážně na normativních postupech a zcela spoléhají na splnění požadavků příslušných norem. Tyto požadavky na opatření zajišťující bezpečnost budov bývají často nadhodnoceny a jejich realizace je navíc poměrně náročná. Zmíněné dokumenty si pokládají za cíl zajistit bezpečnost osob, avšak prostředky k dosažení tohoto cíle nejsou vždy jasně stanoveny. Inženýrský přístup poskytuje větší variabilitu návrhu a podobné nebo ještě efektivnější řešení. Z tohoto důvodu vznikly metody ASET a RSET, které k prokázání bezpečnosti osob používají přístup založený na čase.

METODA ASET

Jako doba dostupná pro evakuaci osob se označuje časový interval, ve kterém jsou podmínky pro evakuaci přijatelné. ASET se věnuje průběhu rozvoje požáru. Bere v potaz čas od zapálení požáru po dobu, kdy už je evakuace nebezpečná kvůli přítomnosti kouře, toxických látek, sálání a vysoké teploty v prostoru. Za mezní bod bezpečného času pro evakuaci se považuje okamžik, kdy podmínky v prostoru nejsou udržitelné a bezpečné pro evakuaci.

Tato práce se zaměřuje na porovnání jednotlivých metod výpočtu bezpečného času pro evakuaci – zejména na zaplnění místnosti kouřem. To sice lze vypočítat ručně, ale výpočty zaberou příliš mnoho času. Práce se proto věnuje i automatizaci metod výpočtu.

METODA PODLE ČSN 73 0802 (A)

V normě ČSN 73 0802 článku 9.1.2 je uveden vzorec (1), který umožňuje výpočet časového limitu t_e . Tento limit stanovuje dobu, po kterou je bezpečná evakuace osob z budovy, než se úniková cesta zaplní zplodinami hoření a kouřem do výškové úrovně 2,5 m nad podlahou.

$$t_e = 1,25 * h_s^{1/2} / a \quad (1)$$

Do tohoto výpočtu vstupují pouze dvě proměnné, a to světlá výška posuzovaného prostoru h_s [m] a součinitel rychlosti odhořívání hořlavých látek a . [1]

METODA PODLE ISO 16735: 2006 (B)

Norma ISO 16735: 2006 nabízí možnost výpočtu času bezpečné evakuace podle vzorce (2) na rozhraní kouřové vrstvy v čase. Tento výpočet se dělí na dva mezní stupně. V prvním stupni se počítá plnění prostoru kouřem v počáteční fázi požáru. Ve druhém stupni se počítá s funkčním odvětráním, kdy produkce kouře je rovna rychlosti odtoku z kouřové vrstvy. Tento stupeň můžeme rozdělit ještě na mechanický nebo přirozený odvod.

Uvažujeme-li s hromaděním kouře u stropu, tím vzniká horní vrstva s rovnoměrnou hustotou. V tomto výpočtu se posuzuje pouze doba, než kouř dosáhne ke svislému okraji otvoru. Vzhledem k tepelné roztažnosti plynů se uvažuje i vytlačováním přebytečného plynu otvorem. [2]

$$z(t) = \left(\frac{0,076 (1 - \chi)^{1/3} * \alpha^{1/3}}{\rho_s} \frac{2}{A} \frac{2}{n + 3} * t^{(1 + \frac{n}{3})} + \frac{1}{H^{2/3}} \right)^{-3/2} \quad (2)$$

Kde ρ_s je hustota kouře [kg/m^3], radiační složka tepla χ , koeficient rychlosti dosažení výkonu požáru α , plocha místnosti A [m^2], mocnina požáru n , čas t [s] a světlá výška místnosti H [m].

PLNĚNÍ MÍSTNOSTI KOUŘEM POMOCÍ METODY PLNĚNÍ BOXU (C)

Model (3) uvažuje obdélníkovou místnost s malým požárem o konstantním tepelném výkonu nacházejícím se na podlaze uprostřed místnosti a počítá rychlost, s jakou se místnost naplní kouřem. Uvažuje se s místností, která má výšku H a poloměr R . Kouřový proud se uvažuje jako bodový. V idealizovaném případě nedochází k promíchání horní horké a spodní studené vrstvy. Charakteristická časová stupnice pro naplnění boxu závisí na rozměru místnosti a síle zdroje.

$$t_f = \frac{\pi R^2}{C H^{2/3} F^{1/3}} \quad (3)$$

Dále do výpočtu vstupuje konstanta proudění kouře C a vztakový tok kouře F [$\text{m}^4 \text{s}^{-3}$]. Poměr stran místností R/H musí být větší jak 0,25. Při menších poměrech stran tento výpočet neplatí. [3]

METODA ZUKOSKI – PLNĚNÍ PROSTORU KOUŘEM (D)

V experimentech, podle kterých byla odvozena tato metoda, byl zachycován proudící plyn digestoří. Tím byla zajištěna konstantní výška vrstvy horkých plynů. Okrajové podmínky pro výpočet zaplnění místnosti kouřem jsou podle tohoto modelu vymezeny jako jedna místnost, ve které se nachází konstantní požár o stálém tepelném výkonu. Z něho stoupá kouř ke stropu, pod kterým postupně začne vytvářet horkou vrstvu. Místnost se tak rozdělí na horkou a studenou vrstvu plynu. Obě vrstvy kouře mají rovnoměrnou teplotu. Dále se předpokládá, že v místnosti není utěsněný otvor, který může být v úrovni podlahy nebo stropu.

Pro účely porovnání modelů výpočtu počítáme s netěsností v úrovni stropu. Pro tyto netěsnosti se jako kontrolní objem uvažuje dolní vrstva. Díky tomu dojde ke zjednodušení rovnice pro plnění místnosti kouřem v bezrozměrném tvaru. V tomto případě je náš kontrolní objem spodní vrstva, a proto bezrozměrnou výšku můžeme vyjádřit jako vzorec (4).

$$\tau = \frac{y^{-2/3} - 1}{0,14 * (Q^*)^{1/3}} \quad (4)$$

Kde y je bezrozměrná výška a Q^* rychlost uvolňování energie. [4]

MODEL PLNĚNÍ KOUŘEM PRO VELKÉ PROSTORY (E)

Tento model je vhodný pro velké prostory, protože se uvažuje s konstantní hodnotou hustoty horní vrstvy plynu. Předpokládá se, že při velikosti prostoru se hodnota bude měnit minimálně. Díky této konstantě můžeme plnění prostoru kouřem počítat pomocí rychlosti uvolňování tepla v čase. Ve výpočtu se uvažuje bodový zdroj tepla a vstupující proměnné, výška prostoru H , plocha místnosti S a čas t . Pro sestavení rovnice se musí stanovit zákon zachování hmotnosti pro horní vrstvu. Při těchto podmínkách byla z rovnice pro rychlost uvolňování tepla odvozena rovnice pro výšku rozhraní kouřové vrstvy. V případě, že mocnina času n je nulová, rychlost uvolňování tepla je konstantní a rovnice výšky rozhraní kouřové vrstvy má upravený tvar (5).

$$z = \left(k * \frac{\alpha^{1/3}}{S} \frac{2 * t^{(1+n/3)}}{n+3} + \frac{1}{H^{2/3}} \right)^{-3/2} \quad (5)$$

Kde k je tepelná vodivost [W/mK], koeficient rychlosti dosažení výkonu požáru α , plocha místnosti S [m²], mocnina požáru n , čas t [s] a světlá výška místnosti H [m]. [4]

DOBA PLNĚNÍ KOUŘEM U POŽÁRŮ BEZ SPRINKLERŮ (F)

V tomto modelu se neuvažují žádná požárně bezpečnostní zařízení. Výpočet doby do kritického stavu je vyjádřen rovnicí plochy odezvy (6). Doba dosažení kritických podmínek závisí na rychlosti růstu požáru α , ploše místnosti a její výšce H , ale platí pouze pro scénář s jednou místností. [5]

$$S = 2,32 \cdot \alpha^{-0,2} \cdot H^{0,3} \cdot Area^{0,6} \quad (6)$$

Tab. 1 Výpočet času zaplnění místnosti časem v různých výškách

Tab. 1 Calculation of room filling time at different heights

		Výška místnosti										
		2.5 m	2.6 m	2.7 m	2.8 m	2.9 m	3.0 m	3.1 m	3.2 m	3.3 m	3.4 m	3.5 m
Metody výpočtu	ČSN 73 0802 (A)	132 s	134 s	137 s	139 s	142 s	144 s	147 s	149 s	151 s	154 s	156bs
	Zukoski (D)	150 s	182 s	211 s	238 s	265 s	289 s	313 s	335 s	356 s	376 s	395 s
	Metoda plnění místnosti kouřem (F)	38 s	39 s	39 s	40 s	40 s	41 s	41 s	41 s	42 s	42 s	42 s
	ISO 16735: 2006 (B)	0 s	8 s	13 s	16 s	19 s	21 s	23 s	25 s	26 s	27 s	30 s
	Model plnění kouřem pro velké prostory (E)	0 s	7 s	13 s	15 s	18 s	20 s	23 s	24 s	26 s	27 s	28 s
	Metoda plnění boxu (C)	281 s	273 s	267 s	260 s	254 s	249 s	243 s	238 s	233 s	229 s	224 s

ŘEŠENÝ PŘÍKLAD

Součástí seminární práce je porovnání metod výpočtu bezpečného času pro evakuaci (viz tab.1). Pro řešený příklad uvažujeme pro všechny vzorce stejné vstupní parametry, abychom mohli porovnat, jaký čas máme, než se místnost zaplní kouřem do výšky 2,5 m. Do všech vzorců nevstupují všechny parametry. Do každé metody vchází různé parametry, ale se stejnými hodnotami. Světlá výška místnosti jako jediná vstupuje do všech výpočtů, určili jsme si ji od 2,5 do 3,5 m. Jako další jsme si určili rozměr místnosti na 5 x 5 m – celková plocha místnosti je tedy 25 m². Pro koeficient rychlosti dosažení výkonu požáru jsme určili hodnotu 0,05 a pro součinitel rychlosti odhořívání hořlavých látek 0,9. Pro metodu Zukoski jsme si museli určit rychlost uvolňování energie, protože se počítá s konstantním výkonem 281,3 kW.

ZÁVĚR

Tabulka 1 obsahuje hodnoty vypočítané různými metodami. Z tohoto srovnání vyplývá, že vstupní parametry a výpočetní metody mají značný vliv. Při použití metody plnění boxu se bezpečný čas

pro evakuaci zkracuje s rostoucí výškou místnosti. Naopak ostatní metody naznačují, že s přibývajícím výškou se bezpečný čas pro evakuaci prodlužuje, přičemž rozdíly mohou být významné. Při metodě plnění boxu se kouř šíří dál od zdroje, což vede k jeho expanzi. To může mít za následek rychlejší akumulaci kouře ve vyšších prostorech, protože kouř se mísí se vzduchem a zvětšuje svůj objem.

LITERATURA

- [1] ČSN 73 0802 ed. 2 - Požární bezpečnost staveb - Nevýrobní objekty. Praha: Český normalizační institut. Zář 2023
- [2] ISO 16735: 2006, Fire safety engineering - Requirements governing algebraic equations - Smoke layers. 15. listopad 2006
- [3] KAYE, N.B. a G.R. HUNT. Smoke filling time for a room due to a small fire: The effect of ceiling height to floor width aspect ratio. *Fire Safety Journal* [online]. 2007, **42**(5), 329–339. ISSN 03797112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2006.12.003
- [4] KARLSSON, B. a QUINTIERE, J. G. *Enclosure Fire Dynamics*. College Park, Maryland, USA: CRC Press LLC, 2000. ISBN 978-048-49313-00-4.
- [5] MAGNUSSON, S. E., H. FRANTZICH a K. HARADA. *Fire Safety Design Based on Calculations. Uncertainty Analysis and Safety Verification*. B.m.: Lund University. 1995

EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠŤOVÁNÍ DAT PRO MODELOVÁNÍ DYNAMIKY OSOB A EVAKUACE

EXPERIMENTAL DATA ACQUISITION FOR MODELLING PEDESTRIAN AND EVACUATION DYNAMICS

Bc. Dominik Košík

Abstract

Research contained in this article aims to provide a new experimental method for acquisition of estimated human body projection, an important variable for evacuation modelling. Estimated human body projection was studied in the late 70's of the last century and the resulting values are still used today. Motivated by the physiological changes of mankind over the years, such as obesity or over-aging trend, the main focus is extraction of area occupied by a single person and the impact on the other variables like crowd density and flow rate. By using the latest technology in camera detection and computational analysis, provided by FIT CTU in Prague, the outcome of this study should be a methodological prescription for extraction of ground projection of the human body.

Key words: Occupied area; Crowd; Density; Anthropometry; Pedestrian.

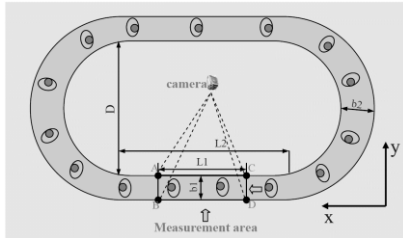
ÚVOD

Přesnost evakuačních modelů používaných pro posouzení návrhu budov z hlediska bezpečnosti a ochrany osob při evakuaci závisí zejména na uživatelském přístupu a přesnosti vstupních dat. Rozsáhlý světový výzkum ohledně evakuačních predikcí se v posledních dvou dekadách zabývá spíše makroskopickými proměnnými jako hustota osob, tok osob, či celkový evakuační čas [1]. Při popisu těchto proměnných jsou osoby interpretovány pouze počtem, a skutečná plocha prostoru obsazená jednotlivými osobami je většinou zanedbávána nebo použité hodnoty jsou 50 let staré [2]. Literární rešerše v rámci tohoto výzkumu je zaměřená na současně používané metody a interpretace popisující hustotu osob v prostoru a půdorysný průmět osob. Experimentální část výzkumu je zaměřená na zkoušení různých variant hardwaru a softwaru, což je klíčové pro výběr nástrojů, které poskytnou dostatečnou kvalitu a spolehlivost pro přesnost popisu půdorysného průmětu osob. Zároveň je cílem, aby finální metoda nebyla vázaná na laboratorní podmínky a díky tomu mohli být vytvořeny data sety různých skupin osob.

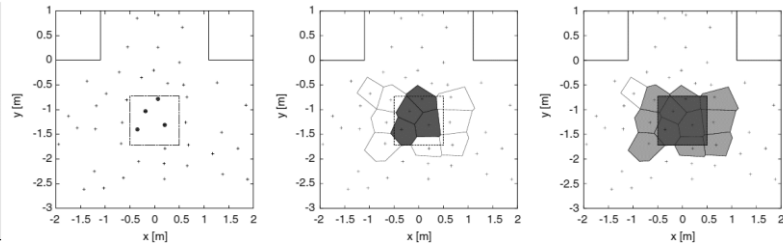
HUSTOTA OSOB

Tento jev je ve vědecké komunitě velmi diskutován kvůli silným neshodám ohledně toho, co vlastně hustota osob znamená při evakuačních experimentech a studiích davu [3]. Ve vědeckých článcích se objevují různé interpretace hustoty osob a metody jejího měření [4]. Dle dimenze pohybu se odvíjí také jednotka hustoty osob. Typickým příkladem je pohyb osob v řadě za sebou, tzv. single file movement [5]. V tomto případě se osoby pohybují jednotlivě v koridoru bez možnosti předcházení (obr. 1) a jednotka popisující hustotu osob je [os/m], tedy počet osob na běžný metr. Jednoduše lze odvodit, že počet osob bude závislý především na atributech lidského kroku jako jeho délka, šířka a kadence, které přímo závisí na věku a fyzické kondici účastníků. Dalším faktorem je psychické vnímání prostoru před sebou, což ovlivňuje rychlost pohybu, jelikož lidé mají tendenci zachovávat si osobní prostor, tzv. diskrétní zónu [4]. V [6] byl poprvé představen vliv výše zmíněné diskrétní zóny pomocí metody založené na rychlosti odrážející minimální dobu do kolize. Autor došel k závěru o konstantním časovém náběhu, který kompenzuje reakční dobu na neočekávané události. Když se osoby můžou pohybovat volně v prostoru jednotka hustoty se změní na [os/m²]. Problém vzniká při rozhodování, zda se osoba nachází uvnitř nebo vně měřené oblasti. Například v [7] autoři předložili použití Voronoiových diagramů (obr. 2), s pomocí kterých existuje více způsobů jak onu osobu zařadit do konkrétní oblasti. Za zmínku stojí také řada metod [8], které operují se vzdáleností mezi osobami. Rozsáhlý výzkum problematiky hustoty osob vedl k vývoji mnoha metod a popisů, které stanovují okrajové podmínky a faktory, na kterých závisí

jak vnímaní, tak odhad hustoty [3]. Tyto metody však uvažují že osoby jsou bezrozměrná veličina a vlastní plocha osob, která ve skutečnosti zastává významnou roli při posuzování využití prostoru či únikových cest, zůstala v 70. letech. Při zohlednění vlastní plochy osob se jednotka opět změní a dostáváme $[m^2 / m^2]$. Zpočátku může být tenhle zápis matoucí, ale po zjednodušení zlomku v principu dostáváme procentuální využití plochy z jmenovatele, což nastiňuje další definici hustoty.



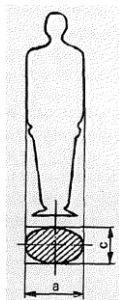
Obr. 1 Pohyb osob v řadě za sebou [9];
Fig. 1 Single file movement [9];



Obr. 2 Příklad Voronoiových diagramů pro určení hustoty osob [7]
Fig. 2 Example of Voronoi diagrams for density estimation [7]

PŮDORYSNÝ PRŮMĚT OSOB

Koncept půdorysného průmětu lidského těla byl poprvé představen v 70. letech 20. století v [2] a [10], kde autoři poukázali na důležitost zohlednění fyzikálních vlastností lidského těla při plánování pěšího provozu v budovách. V publikacích jsou zohledněny proměnné jako je věk, typ oblečení nebo nošené doplňky (obr. 3). Půdorysný průmět byl aproximován na elipsu (obr. 4), jejíž osy odpovídají šířce ramen a hloubce v úrovni hrudníku. Je potřeba podotknout, že půdorysný průmět, neboli plocha, závisí také od druhu pohybu například stacionární stav, chůze, běh, klesání nebo stoupání do schodů [10]. I když této tématice nebyla od 70. let v souvislosti s evakuací osob věnovaná taková pozornost, tak při navrhování a posuzování dopravních prostředků se tyto parametry zohledňují [11].



Obr. 3 Půdorysný průmět osoby [2]
Fig. 3 Plane projection of a person [2]

Age and dress of person	Width a , m	Thickness c , m	Area of horizontal projection of f , m^2
Adult:			
In summer dress	0.46	0.28	0.1
In mid-season street dress	0.48	0.3	0.113
In winter street dress	0.5	0.32	0.125
Youth	0.43–0.38	0.27–0.22	0.09–0.067
Child	0.34–0.3	0.21–0.17	0.056–0.04
Adult:			
With child in arms	0.75	0.48	0.285
With baggage in hand	0.9–1.1	0.75	0.35–0.825
With knapsack	0.5	0.8	0.315
With light package	0.75	0.4	0.235

Obr. 4 Tabulka rozměrů elips [2]
Fig. 4 Ellipse dimensions table [2]

OPTIMALIZAČNÍ EXPERIMENT

Důležitou roli při získávání dat hraje správný výběr nástrojů pro extrakci a analýzu. Z tohoto důvodu se provádí optimalizační experimenty, jejichž cílem je odhalit možné nedostatky použitých metod pro získání půdorysného průmětu osob a především vhodnost hardwaru. Počet optimalizačních experimentů není předem stanoven, protože potřeby výzkumu se v průběhu mění. První optimalizační experiment proběhl v laboratoři zpracování obrazu ImproLab na FIT ČVUT v Praze. Kolegové z ImproLab poskytli kamery, které byly v sériové konfiguraci namontovány nad dveřmi této místnosti (obr. 5). Jednou z kamer byl ultra širokouhlý varifokální objektiv Theia, který dokáže zachytit široké zorné pole bez soudkovitého zkreslení nebo zkreslení rybiho oka. Dále byla

použita hloubková kamera Intel RealSense, která s využitím stereoskopických snímačů a infračerveného projektoru vykresluje hloubky objektů. V zorném poli kamer byl na zemi vyznačen rastr a v průsečnicích byly vytvořené fotografie nivelační latě pro určení výškových úrovní. Následně bylo provedeno osm zkušebních běhů, kterých se účastnili kolegové z FIT (5 osob), při kterých byly testovány způsoby detekce osob a také výstupy z hloubkové kamery (obr. 6). Prvotní analýza naznačuje zjednodušení při promítání do půdorysné roviny díky objektivu Theia. Data z kamery RealSense zase umožňují vykreslení kontur osob v různých rovinách. Což vede k získání plochy.



Obr. 5 Umístění kamer
Fig. 5 Camera placement



A)



B)

Obr. 6 (A) Výstupy z RealSense; (B) Výstup Theia
Fig. 6 (A) Outputs from RealSense; (B) Outputs from

ZÁVĚR

V důsledku zvyšujícího se počtu osob s nadváhou a také starších osob, které používají různé podpůrné pomůcky je potřeba zkoumat vliv současných, skutečných rozměrů osob na makroskopické evakuační proměnné, zejména hustotu a tok osob. S využitím vyspělých kamerových technologií je možné extrahovat tyto rozměry a vytvářet ucelené data sety různých skupin osob. Zároveň pokročilé výpočetní algoritmy umožňují přímo zohlednit tyto rozměry ve výpočtu hustoty a toku osob. Z výstupů z prvního optimalizačního experimentu je patrné, že hloubková kamera RealSense je vhodnou volbou a poskytuje dostatečnou kvalitu a množství potřebných informací pro další analýzu, usnadněnou o příspěvek objektivu Theia. V dalších fázích budou aplikovány různé detekční softwary pro extrakci trajektorie.

LITERATURA

- [1] STEFFEN, B.; SEYFRIED, A. Methods for measuring pedestrian density, flow, speed and direction with minimal scatter. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* [online]. 2010, roč. 389, č. 9, pp. 1902–1910 [visited on 2024-03-12]. issn 03784371. Available from doi: 10.1016/j.physa.2009.12.015.
- [2] PREDTECHENSKII, V.M.; MILINSKII, A.I. Planning for Foot Traffic Flow in Buildings. Amerind, 1978. TT. isbn 978-0-86249-326-4. Available also from: <https://books.google.cz/books?id=3AZaPwAACAAJ>.
- [3] HAGHANI, Milad; SARVI, Majid. Crowd behaviour and motion: Empirical methods. *Transportation Research Part B: Methodological* [online]. 2018, roč. 107, pp. 253–294 [visited on 2024-03-12]. issn 01912615. Available from doi: 10.1016/j.trb.2017.06.017.
- [4] DUIVES, Dorine C.; DAAMEN, Winnie; HOOGENDOORN, Serge P. Quantification of the level of crowdedness for pedestrian movements. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* [online]. 2015, roč. 427, pp. 162–180 [visited on 2024-04-13]. issn 03784371. Available from doi: 10.1016/j.physa.2014.11.054.
- [5] SUBAIH, Rudina, TORDEUX, Antoine a CHRAIBI, Mohcine, 2024. Comprehensive Review and New Analysis Software for Single-file Pedestrian Experiments [online]. arXiv:2404.11937. arXiv. arXiv:2404.11937. Získáno z: <http://arxiv.org/abs/2404.11937> [viděno 20 květen 2024]. arXiv:2404.11937 [physics]
- [6] FANG, Zhi-Ming; SONG, Wei-Guo; LIU, Xuan; LV, Wei; MA, Jian; XIAO, Xia., A continuous distance model (CDM) for the single-file pedestrian movement considering step frequency and length. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* [online]. 2012, roč. 391, č. 1-2, pp. 307–316 [visited on 2024-04-13]. issn 03784371. Available from doi: 10.1016/j.physa.2011.08.009.
- [7] JOHANSSON, Anders. Constant-net-time headway as a key mechanism behind pedestrian flow dynamics. *Physical Review E* [online]. 2009, roč. 80, č. 2, p. 026120 [visited on 2024-04-13]. issn 1539-3755, issn 1550-2376. Available from doi: 10.1103/PhysRevE.80.026120.
- [8] HELBING, Dirk; JOHANSSON, Anders; AL-ABIDEEN, Habib Zein. Dynamics of crowd disasters: An empirical study. *Physical Review E* [online]. 2007, roč. 75, č. 4, p. 046109 [visited on 2024-04-21]. issn 1539-3755, issn 1550-2376. Available from doi: 10.1103/PhysRevE.75.046109.
- [9] SONG, Weiguo; LV, Wei; FANG, Zhiming. Experiment and Modeling of Microscopic Movement Characteristic of Pedestrians. *Procedia Engineering* [online]. 2013, roč. 62, pp. 56–70 [visited on 2024-04-20]. issn 18777058. Available from doi: 10.1016/j.proeng.2013.08.044.
- [10] FRUIN, J.J. Pedestrian Planning and Design. Metropolitan Association of Urban Designers a Environmental Planners, 1971. Available also from: <https://books.google.cz/books?id=AydSAAAAMAAJ>.
- [11] MELIS, Damien J. et al., 2020. The effect of airline passenger anthropometry on aircraft emergency evacuations. *Safety Science*. Vol. 128, p. 104749. DOI 10.1016/j.ssci.2020.104749.

STANOVENÍ VLIVU EXTERNÍ KOMPOZITNÍ VÝZTUŽE NA ODOLNOST ŽELEZOBETONOVÝCH PRIZMATICKÝCH PRVKŮ VŮČI VYSOKÝM TEPLOTÁM

DETERMINATION OF THE EFFECT OF EXTERNAL COMPOSITE REINFORCEMENT ON THE HIGH TEMPERATURE RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE PRISMATIC ELEMENTS

Bc. Jakub Koranda

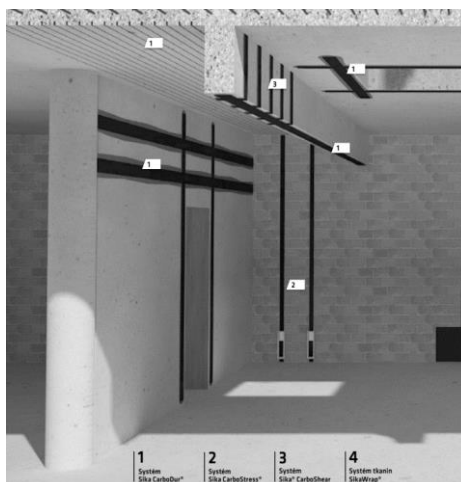
Abstract

In this thesis, we will investigate the effect of high temperatures on reinforced concrete horizontal structural elements reinforced with composite slats. This thesis is a partial work of the grant project New generation carbon slat system with increased fire resistance for strengthening of existing structures. The aim of this work is to assess and test the resin adhesive against high temperatures in a scaled model, with an overlap to the next part of the project, namely the large-scale test. The thesis deals with the existing reinforcement solution for reinforced concrete structures and their additional fire resistance, the testing of a newly developed high temperature resistant adhesive in a reduced model and evaluates other more economical alternatives to achieve fire resistance of the whole structure. The primary focus of the work is the testing of the newly developed adhesives in a scaled-down model of the structure, followed by an analysis of the high temperature behaviour in a given fire situation in the premises, with a view to achieving at least the lowest possible fire resistance of the whole structure.

Key words: composite slats; fire resistance; beam reinforcement; reinforced concrete; FRP.

ÚVOD

V dnešní době rozvoje udržitelné výstavby, ekologických otázek, zastavěností veřejného prostoru a rychlosti výstavby se v čím dál větší míře přistupuje ke znovuvyužití již postavených objektů a budov. S tímto přístupem ale přichází mnoho závažných otázek a jedna z nejdůležitější je právě tématem této diplomové práce a to statická únosnost a s ní spojené dodatečné vyztužení horizontálních železobetonových prvků kompozitními lamelami a jejich reakce na vysoké teploty. Metoda dodatečného vyztužení (viz Obr. 1) není žádnou novinkou, ale ochrana těchto systému proti vlivu vysoké teploty je stále vysoce neefektivní a neekonomická. [1, 2]



Obr. 1 Systémy zesilování nosných konstrukcí [3]

Fig. 1 Load-bearing structures reinforcement systems[3]

Zhoršování stavu stropních desek, nosníků, trámů a sloupů budov z důvodu stárnutí, vlivu životního prostředí, degradaci, špatnému počátečnímu návrhu nebo nedostatečné údržbě a náhodným mimořádným událostem, jako je zemětřesení, příp. jiné katastrofy často směřuje k postupnému

kolapsu. Rostoucí rozpad infrastruktury je často kombinován s potřebou modernizace a změnou využití stávajících prostor, kde konstrukce musí splňovat přísnější požadavky, které překračují původní návrhové zatížení a zároveň musí být navrženy na požadavky nové a přísnější legislativy. Vzhledem ke stále vyšší zástavě veřejného prostoru je v posledních letech této problematice a využití již postavených objektů přikládána stále větší pozornost. [4]

PROBLEMATIKA VYSOKÝCH TEPLOT

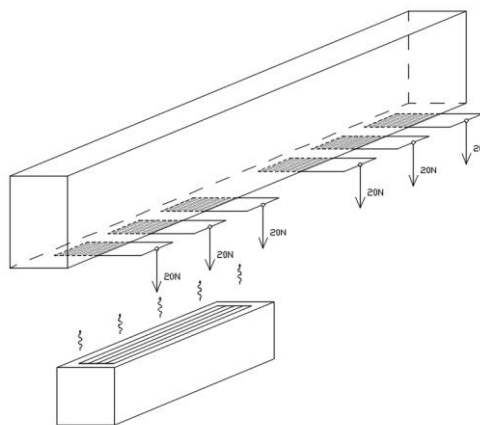
Kompozitní materiály FRP jsou ve stavebnictví stále relativní novinkou a mnoho inženýrů zatím nezná jejich vlastnosti a charakteristiky. Z hlediska statické únosnosti za běžné teploty se jedná o vcelku prozkoumané a rozvinuté pole, nýbrž z hlediska únosnosti za zvýšených teplot se jedná o neprobádané vody a do dnešních dní byla požární odolnost řešena v kooperaci s požárně odolným obkladem příp. podhledem s požární odolností, což je ve většině případů velmi finančně náročné a z pohledu investice do zesílení konstrukce neekonomické.

V mnoho případech není prioritou vizuální stránka, tudíž velmi často několikanásobně dražší požární podhled než samo vyztužení je požadován jen z pohledu požární bezpečnosti a naším cílem je tuto velmi nákladnou položku co nejvíce zlevnit. [1, 5]

VÝVOJ REFERENČNÍ ZKOUŠKY

V rámci diplomové práce se v první řadě zabýváme odzkoušením nově vyvinutých lepidel a analyzujeme jejich reakci na vysoké teploty. Diplomová práce navazuje na několik předchozích prací, které v první části grantu vyřešili některé otázky, na které navazujeme. Jejich zkušební modely byly neekonomické z pohledu zkoušek většího množství lepidel a sledování jejich reakcí. Proto jsme navrhli dílčí zkoušku, která ušetří velké množství materiálu, času a přesto nám dá dostatečné data pro naši potřebu (schéma viz Obr. 2).

Dílčí zkouška nemá připomínat reálnou konstrukci. Zmenšený model reálné konstrukce již částečně řešili kolegové v předchozí části, ke kterému se s vybraným lepidlem pravděpodobně vrátíme. Referenční zkouška umožňuje zkoušet až 4 lamely současně, přičemž na zkoušeném železobetonovém trámci mohou být dvě sady lamel zároveň, tudíž je možné odzkoušet při jednom experimentu až 8 lamel. V rámci referenční zkoušky bylo vymezeno potřebné zatížení na lamelu, které napomůže jejímu odtržení, jakmile lepidlo vlivem vysoké teploty lepidlo naprosto degraduje. Samotné lepidlo má totiž stále dostatečnou adhezi, kterou vlastní tíha lamely nepřevyšuje.



Obr. 2 – schéma referenční zkoušky

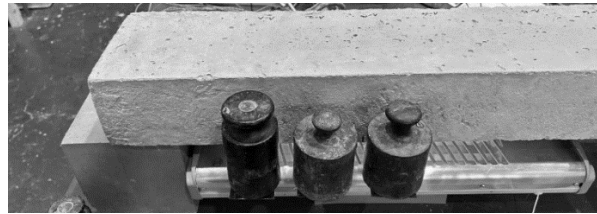
Fig. 2 – reference experiment scheme

REFERENČNÍ ZKOUŠKA Č. 1 A 2

V rámci vymezení okrajových podmínek referenční zkoušky byly použity lamely Sika CARBODUR 50 mm tl. 1,2 mm za použití lepidla Sika SIKADUR 30. V rámci první zkoušky došlo k posunu te-

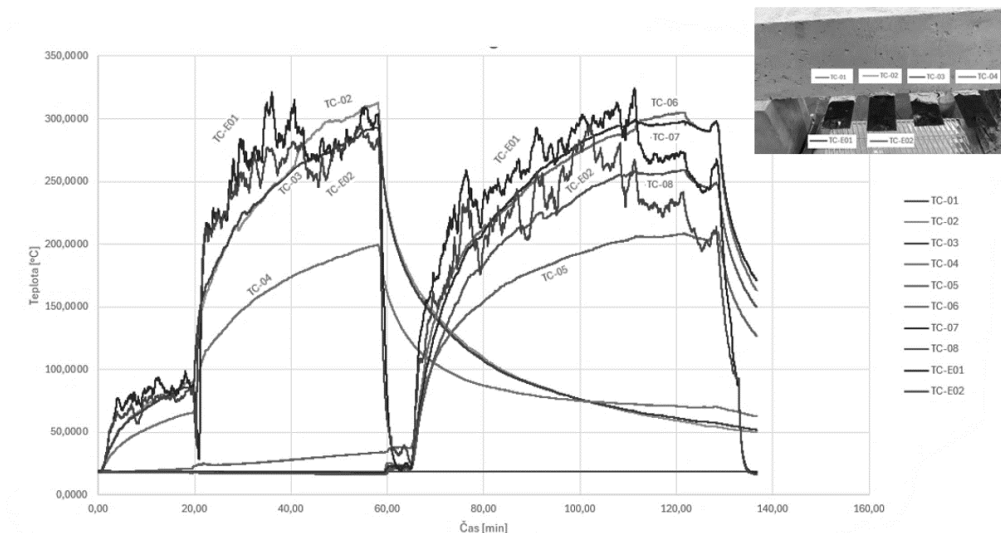
plného zdroje na vzdálenost 40 mm od vzorku a postupného přitěžování lamel a zkoušením různých hmotností ve vzdálenosti 55 mm od hrany trámce (viz Obr 4).

Po odzkoušení velké škály zatížení od 0 po 2,5 kg, bylo v rámci druhé referenční zkoušky zanalyzováno ideální zatížení lamely a to 20 N (2 kg) ve vzdálenosti 55 mm od zafixovaného kraje lamely lepidlem (viz Obr. 3 a Obr. 5). Dále byl zredukován počet lamel při jednom vzorku na 3 z důvodu lepší expozice a rychlejšího nárůstu teploty v lepidle.

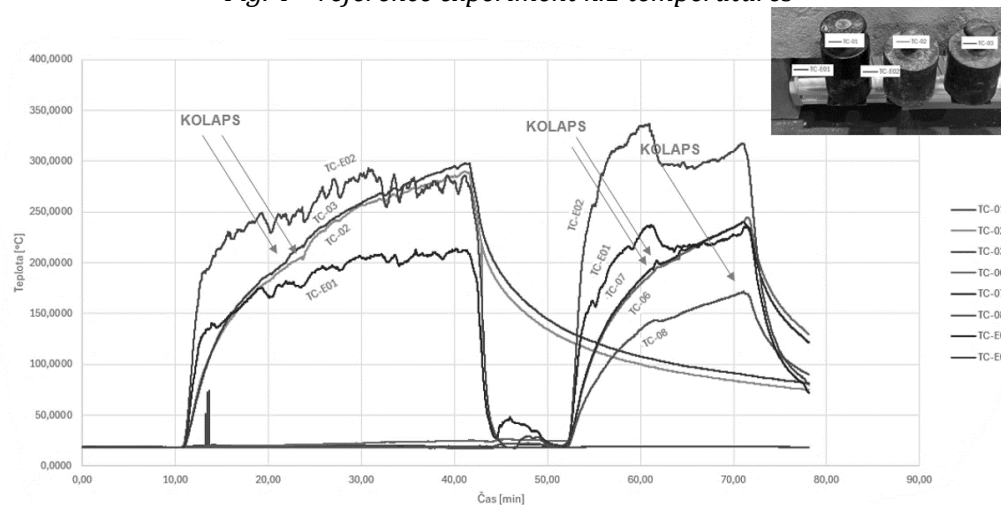


Obr. 3 – referenční zkouška
Fig. 3 – reference experiment

Níže jsou porovnávány grafy 1. a 2. referenční zkoušky, kde po vymezení okrajových podmínek je zřejmé, že komerčně využívané lepidlo SIKADUR 30 naprosto degraduje při 200°C (viz Obr. 5).



Obr. 4 – teploty referenční zkoušky č.1
Fig. 4 – reference experiment n.1 temperatures



Obr. 5 – teploty referenční zkoušky č.2
Fig. 5 – reference experiment n.2 temperatures

ZÁVĚR

Dosavadní výsledky a rozpracovanost diplomové práce jsou v bodě, kdy je daná problematika náležitě zmapována a jsou vymezeny podmínky dílčí referenční zkoušky. V dalších fázích diplomové práce se budou touto zkouškou analyzovat nově vyvinutá lepidla s požární odolností a po selekci těch s ideálními vlastnostmi se začnou zkoušet na zmenšeném modelu reálné konstrukce (průvlak) s předpokládanou požární situací a zatížením.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji pracovníkům katedry experimentálního centra (zejm. Ing. Marcelu Joglovi, Ph.D.), katedry betonových a zděných konstrukcí (zejm. Ing. Radkovi Štefanovi, Ph.D. FEng.), katedry ocelových a dřevěných konstrukcí (zejm. Ing. Jakubovi Šejnovi) a zároveň za zapojení do grantu *Systém uhlíkových lamel nové generace se zvýšenou požární odolností pro zesilování stávajících konstrukcí*.

LITERATURA

- [1] Grantová přihláška. Systém uhlíkových lamel nové generace se zvýšenou požární odolností pro zesilování stávajících konstrukcí. TAČR projekt č. FW06010142. 2022.
- [2] Bc. Valeriia Kuzmina. "Experimentální a numerická analýza železobetonových prvků zesílených kompozitními lamelami". Diplomová práce. ČVUT v Praze, 2024. [cit. 2024-03-09] URL: https://dspace.cvut.cz/handle/10467/113884?fbclid=IwAR0lb1DMozMk9y-Qwm_GxmkdMg-NSShawY3MgX62AhpUjOA8DVP1s4Rp6xw
- [3] Sika CZ s.r.o. Metodická příručka zesilování konstrukcí blízko k povrchu - Sika CarboDur systém. 2020. [cit. 2024-03-09] URL: <https://cze.sika.com/dam/dms/cz01/d/mp-Sika-Carbodur-dodatecne-vyztuzeni-konstrukci-blizko-k-povrchu.pdf>
- [4] Fib Bulletin No. 14. Technical report: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. *The International Federation for Structural Concrete*. 2001.
- [5] Fib Bulletin No. 40. Technical report: FRP reinforcement in RC structures. *The International Federation for Structural Concrete*. Roč. 2007.
- [6] PRODUKTOVÝ LIST Sikadur®-30. <https://cze.sika.com/> [online]. 2023 [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: https://cze.sika.com/content/dam/dms/cz01/4/sikadur_-30.pdf
- [7] Bc. Pavel Hejduk. "Experimentální analýza železobetonových prvků zesílených kompozitními lamelami vystavených vysokým teplotám". Diplomová práce. ČVUT v Praze, 2024. [cit. 2024-03-09] URL: https://dspace.cvut.cz/handle/10467/113811?fbclid=IwAR3Z0ueKrXxWumvFRboc2_e5gFRa5uDIWrano1di-0RbBkU2CrlqArduuc
- [8] Lenka Malínková. "Zesilování železobetonových konstrukcí kompozitními materiály". Bakalářská práce. ČVUT v Praze, 2023. [cit. 2024-03-09] URL: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/110332>
- [9] Dong, Kun, Ke-Xu Hu, Wan-Yang Gao, a Shu-Tong Yang. "Fire endurance tests of CFRP-strengthened RC beams with different insulation schemes". *Structures* 56 (1. říjen 2023): 104887. [cit. 2024-03-09] <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104887>
- [10] Chopped carbon fibre. *CARBONFIBER.CZ* [online]. [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://en.carbonfiber.cz/products/sekana-vlakna>
- [11] CARBON2. Carbon Fibres: Production, Properties and Potential Use. *Material Science Research India* [online]. [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.materialsciencejournal.org/vol14no1/carbon-fibres-production-properties-and-potential-use/>

POŽÁRNÍ ŘEŠENÍ SKLADOVÝCH OBJEKTŮ FIRE SOLUTIONS OF WAREHOUSE BUILDINGS

Bc. Kateřina Kráslová

Abstract

This paper focuses on fire safety solutions for warehouses. The paper analyses ČSN 73 0845, which serves as the main basis for fire safety solutions in the Czech Republic. Furthermore, NFPA standards, requirements in Portugal and Canada are analysed for comparison. Finally, a software tool is presented that will provide a tool for determining the group of warehouse operations according to Annex A of ČSN 73 0845.

Key words: fire safety; warehouse; warehouse racking systems; fire safety resistance; fire safety compartment.

ÚVOD

Díky narůstajícím požadavkům obchodu vznikají velkokapacitní logistická centra, která požadují co největší možnou prostorovou otevřenost a propojenost jednotlivých částí. V rámci trendů se čím dál tím více rozvíjí automatizace, která nahrazuje lidskou pracovní sílu roboty a využívají se například regály jako nosné konstrukce skladů. A tak vzniká otázka, jak se k těmto požadavkům staví norma ČSN 73 0845, která slouží jako hlavní podklad, pro řešení požární bezpečnosti ve skladových objektech. Pro porovnání přístupů k řešení požární bezpečnosti ve skladech, jsou analyzovány podklady, které se používají v Portugalsku a Kanadě, a dále požadavky, které stanovuje The National Fire Protection Association (NFPA). V závěru je zmíněna softwarová pomůcka, která bude v rámci semestrální práce vytvořena. Jedná se o pomůcku, která bude určovat skupinu provozu skladů dle přílohy A ČSN 73 0845. Díky této pomůcce bude proces stanovení zjednodušen a bude eliminovat případné chyby, které mohou do výpočtu vstoupit.

PŘÍSTUP V ČESKÉ REPUBLICCE – ČSN 73 0845

Současným výchozím materiálem pro řešení požární bezpečnosti skladových objektů je ČSN 73 0845 s ohledem na požadavky ČSN 73 0804 ed.2 a dalších. Norma byla vydána v roce 2012 a platí pro projektování nových skladů, změn staveb stávajících skladů a změn staveb z jiného účelu na sklady. V první řadě je nutné sklad zařadit dle čl. 4.1, který rozděluje požární úseky skladů do 4 skupin v závislosti na velikosti půdorysné plochy požárního úseku, podlažích a využití objektu. Požární úseky se zařazují do následujících skupin, když je jejich půdorysná plocha větší než:

- a) 150 m² v podzemních podlažích, přičemž u objektů, které mají nad podzemním podlažím nejvýše jedno nadzemní podlaží, může být půdorysná plocha dvojnásobná;
- b) 300 m² v nadzemních podlažích u vícepodlažních objektů;
- c) 600 m² v jednopodlažním objektu sloužícím současně jiným účelům;
- d) 1000 m² v jednopodlažním objektu, který slouží pouze ke skladování. [1]

Dále se v souladu s jednotlivými kapitolami normy řeší: požární riziko, ekonomické riziko, stupeň požární bezpečnosti, stavební konstrukce, únikové cesty, odstupy a zařízení pro protipožární zásah. Norma obsahuje tři přílohy. Příloha A je normativní a řeší skupiny provozů skladů. Příloha B je také normativní a stanovuje limitní hodnoty, od kterých je nutné užití požárně bezpečnostních zařízení. Příloha C je pouze informativní a řeší hodnocení obalů skladovaných materiálů. [1]

Norma například omezuje plochu požárních úseků. Do výpočtu mezní plochy se mimo jiné propisuje i vybavení požárního úseku elektrickou požární signalizací (EPS), samočinným stabilním hasicím zařízením (SSHZ) nebo zařízením pro odvod kouře a tepla (ZOKT). Při použití zmíněných systémů, dosahuje maximální plocha vyšších hodnot. V návaznosti na instalaci těchto systémů,

norma povoluje například i větší skladovací výšky. [1, 2]

Co se týče stupně požární bezpečnosti, je pro PÚ skladů stanoven nejméně IV. spb. Od toho se odvíjí i požadavky na konstrukce, které musejí vykazovat požární odolnost po dobu alespoň: 90 min a být druhu DP1 (nosné konstrukce v podzemních podlažích a konstrukce mezi objekty), 60 min (nosné konstrukce v nadzemních podlažích uvnitř objektu) a 30 min (nosné konstrukce v posledním nadzemním podlaží, nosné konstrukce střech, a tak dále). Jednotlivé požadované požární odolnosti jsou podrobně stanoveny v tabulce 10 ČSN 73 0804 ed.2. [2]

ŘEŠENÍ DLE NFPA

The National Fire Protection Association vydává předpisy a normy, které jsou vyvíjeny odborníky z celého světa a slouží jako hlavní zdroj pokynů a požadavků na požární bezpečnost. Požární bezpečností skladů se zabývá norma NFPA 1 „Fire Code“, kde se na skladování zaměřuje především kapitola 34 – Obecné skladování. Dle požadavků článků 34.2.x se skladované výrobky musejí klasifikovat, přičemž klasifikace zohledňuje veškeré materiály, které se nacházejí v individuálních skladovacích jednotkách. Nejedná se pouze o materiál produktu, ale i o jeho obal a popřípadě palety. Komodity se klasifikují do třídy I (nejnižší klasifikace), třídy II, třídy III, třídy IV, neexpandovaných plastů v kartonu, expandovaných plastů v kartonu, exponovaných neexpandovaných plastů a exponovaných expandovaných plastů (nejvyšší klasifikace). Plasty se zároveň klasifikují do skupin A, B a C. [3]

Články 34.8.x se zaměřují na požární ochranu regálového skladování, a například uvádějí i řešení skladů, jejichž nosnou konstrukci tvoří samotné ocelové regály. V případě, kdy je takový objekt vybaven sprinklerovým zařízením u stropu a mezi regály, není pro tyto ocelové konstrukce požadovaná žádná požární odolnost. Pokud je objekt vybaven sprinklerovým zařízením pouze u stropu, musejí ocelové sloupy vykazovat požární odolnost po dobu alespoň 60 min. [3]

ŘEŠENÍ V PORTUGALSKU

Požární bezpečnost skladů jak nových, tak stávajících se řídí ustanoveními zákonné vyhlášky 220/2008 a nařízením 1532/2008. Zákonná vyhláška 220/2008 definuje právní rámec pro požární bezpečnost v budovách všech typů, přičemž některé specifické požadavky závisí na způsobu užívání. Budovy jsou dle typu užívání rozděleny do 12 typů a v závislosti na typu, jsou dle specifických požadavků zařazeny do jedné ze čtyř kategorií rizik. Skladové objekty spadají do typu XII „průmysl, dílky, sklady“. Stanovení kategorie rizika závisí na tom, zda je sklad vnitřní či venkovní, dále na počtu podlaží pod referenční rovinou a na modifikované hustotě požárního zatížení. [4]

Po charakteristice skladu dle zákonné vyhlášky 220/2008 se přechází k ministerské vyhlášce 1532/2008, která stanovuje technické podmínky požární ochrany staveb. Stanovuje například požadavky na přístupové komunikace, vzdálenosti mezi budovami, vybavení pro požární zásah, požární odolnosti konstrukcí, únikové cesty, technické instalace budov a požárně bezpečnostní zařízení a systémy. [5]

Tab. 1 Mezní plochy požárních úseků skladů, převzato z [5]

Tab. 1 Limit areas of fire compartments of warehouses, taken from [5]

Případ	Umístění vzhledem k referenční rovině	Kategorie rizika			
		1	2	3	4
I	Nad	1600 m ²	800 m ²	400 m ²	
	Pod	Nelze	400 m ²		
II	Nad	6400 m ²	2400 m ²	800 m ²	400 m ²
	Pod	Nelze	800 m ²	400 m ²	
III	Nad	12800 m ²	4800 m ²	2400 m ²	1200 m ²
	Pod	Nelze	2400 m ²	800 m ²	400 m ²
IV	Nad	Neomezené			

Požadované požární odolnosti jsou v závislosti na kategorii rizika 60 min (1. kategorie), 90 min (2. kategorie), 120 min (3. kategorie) a 180 min (4. kategorie). Veškeré skladové objekty musejí být vybaveny poplachovými a detekčními systémy, které musejí například obsahovat tlačítkové hlásiče, samočinné hlásiče atd. Zároveň musejí být skladové objekty vybaveny odvodem kouře, a to zejména na únikových cestách. [5]

V osmé části jsou stanoveny specifické požadavky na jednotlivé typy využití, kdy typem XII se zabývá kapitola 10. V této části se nachází i tabulka 1 s mezními plochami požárních úseků skladů, která je v následující tabulce. Tyto plochy je možné až zdvojnásobit při instalaci sprinklerového hasicího zařízení. [5]

Případ I odpovídá budově, ve které se vyskytuje více způsobů využití. [5]

Případ II odpovídá budově výhradně určené k užívání typu XII, která má štítovou stěnu společnou s ostatními budovami, ve kterých jsou obytné či jídelní prostory, které přijímají veřejnost. [5]

Případ III odpovídá budově výhradně určené k užívání typu XII, která má štítovou stěnu společnou s jinými budovami, rovněž výhradně určeným pro stejný způsob využití, přičemž splňuje vzdálenosti uvedené v odstavcích 3, 4 a 5 článku 300 ve vztahu k jakýmkoliv jiným budovám s obytnými prostory nebo provozovny přijímajícími veřejnost. [5]

Případ IV odpovídá samostatně stojící budově výhradně určené k užívání typu XII, bez podlaží pod referenční rovinou, která splňuje vzdálenosti uvedené v odstavcích 3, 4 a 5 článku 300. [5]

ŘEŠENÍ V KANADĚ

Návrh požární bezpečnosti vychází ze dvou dokumentů, kterými jsou kanadské národní stavební předpisy z roku 2020 (NBC) a kanadské národní požární předpisy z roku 2020 (NFC). V NBC se návrhem požární bezpečnosti zabývá především část 3 – Požární ochrana, bezpečnost osob a přístupnost z oddílu B svazku 1. Kapitoulou 3.1.2 se budovy nebo jejich části klasifikují na základě využití. Skladové objekty mohou být zařazeny do skupiny F2 (průmyslové prostory se středním rizikem) nebo F3 (průmyslové prostory s nízkým rizikem), v závislosti na obsahu hořlaviny na podlahovou plochu. Dokument dále v závislosti na zařazení stanovuje požadavky na konstrukce, odstupové vzdálenosti od budov, povinnosti instalace poplachových a detekčních systémů, požadavky na požární zásah a únikové cesty. [6]

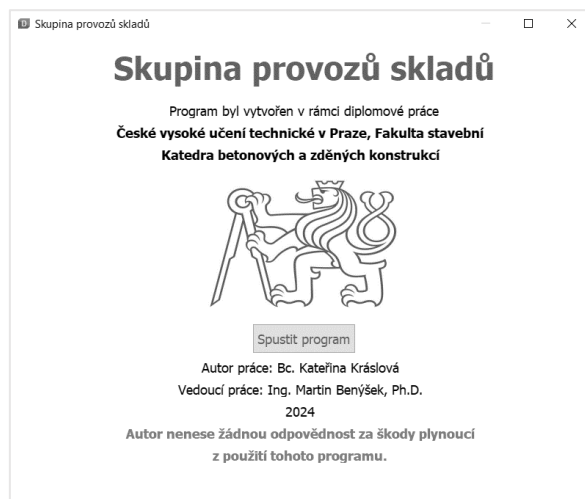
Vybavení poplachovým systémem se požaduje v budovách, které jsou vybaveny automatickým sprinklerovým zařízením, a dále v budovách bez sprinklerového zařízení, ve kterých se nachází průmyslové prostory se středním rizikem a s počtem osob vyšším než 75 nad nebo pod prvním podlažím. [6]

Čl. 3.2.2.76 až 3.2.2.91 stanovují mezní plochy objektů, požadavky na materiály konstrukcí a zároveň jejich požadované požární odolnosti. Tyto požadavky se odvíjí od skupiny, do které jsou skladové objekty zařazeny (F2/F3), počtu podlaží a instalace sprinklerového zařízení. Norma například umožňuje variantu, kdy není omezen počet podlaží ani plocha objektu. Toto řešení je možné v budovách, které jsou vybaveny sprinklerovým zařízením, mají nehořlavé konstrukce s požadovanou požární odolností požárně dělících stropních konstrukcí 120 min, mezipatrových konstrukcí 60 min a svislých nosných konstrukcí alespoň takovou, jakou mají konstrukce, kterou podporávají. Pro konstrukce je v tomto případě povoleno i použití těžkých dřevěných konstrukcí, a to pouze v budovách do dvou podlaží, pro střešní konstrukce a konstrukce v patře pod nimi. [6]

V NFC se na požární bezpečnost skladových objektů zaměřuje část 3 – Vnitřní a venkovní skladování oddílu B. Skladované komodity se musejí klasifikovat do třídy I, třídy II, třídy III, třídy IV, plastů skupiny A, B nebo C. V závislosti na klasifikaci komodit se poté například omezují plochy individuálních skladovacích ploch a zároveň výšky skladování. Tyto limitní hodnoty závisejí kromě klasifikace i na vybavení sprinklerovým zařízením. [7]

VÝPOČETNÍ SOFTWARE

Součástí práce je tvorba výpočetního softwaru, který bude sloužit jako pomůcka pro zařazení požárních úseků skladů do skupiny provozů skladů. Požární úseky skladů budou zařazeny podle postupu stanoveného v příloze A ČSN 73 0845 a software bude sloužit výhradně pro sklady tuhých látek. Pomůcka je vytvořena v kódovacím jazyce Python. Prototyp vstupního okna je na obr. 1.



Obr. 1 Prototyp vstupního okna programu
Fig. 1 Prototype of the program input window

ZÁVĚR

V České republice slouží pro návrh požární bezpečnosti skladových objektů především norma ČSN 73 0845, NFPA řeší požární bezpečnost skladů v dokumentu NFPA 1 „Fire Code“, v Portugalsku se jedná o Zákonnou vyhlášku 220/2008 a Ministerskou vyhlášku 1532/2008 a v Kanadě o Kanadské národní stavební předpisy a Kanadské národní požární předpisy. Po podrobné rešerši bylo zjištěno, že nejmírnější požadavky na požární odolnost konstrukcí, má ČSN 73 0845, a to 30 min. Co se týče vybavení aktivními prvky požární ochrany, tak je ve všech podkladech výbava něčím podmíněna. Jak portugalská, tak kanadská legislativa, na rozdíl od české, umožňuje za splnění určitých podmínek neomezené skladovací plochy. Pouze NFPA, poskytuje řešení nosných konstrukcí skladů, které jsou tvořeny ocelovými regály. Navazující diplomová práce se bude věnovat požární odolnosti konstrukcí a modelování požáru ve skladových objektech.

LITERATURA

- [1] ČSN 73 0845 Požární bezpečnost staveb – Sklady. květen 2012
- [2] ČSN 73 0804 ed.2 Požární bezpečnost staveb – Výrobní objekty. září 2023
- [3] Free Access – NFPA 1: Fire Code [online]. [vid. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://link.nfpa.org/free-access/publications/1/2024>
- [4] Decreto-Lei n.o 220/2008 de 12 de novembro – Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndio em Edifícios. listopad 2008
- [5] Portaria n.o 1532/2008 de 29 de dezembro – Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios. prosinec 2008
- [6] CANADIAN COMMISSION ON BUILDING AND FIRE CODES. National Building Code of Canada: 2020 [online]. 978-0-660-37913-5. B.m.: National Research Council of Canada. 2022. Dostupné z: doi:10.4224/w324-hv93
- [7] CANADIAN COMMISSION ON BUILDING AND FIRE CODES. National Fire Code of Canada: 2020 [online]. 978-0-660-37929-6. B.m.: National Research Council of Canada. 2022. Dostupné z: doi:10.4224/tx9t-j486

ŘEŠENÍ BETONOVÝCH ZÁKLADŮ POD SILEM V RÁMCI PROTIVÝBUCHOVÉ OCHRANY

SOLUTION OF CONCRETE FOUNDATIONS UNDER SILOS WITHIN EXPLOSION PROTECTION

Bc. Kristína Biela

Abstract

This article deals with the silo in the context of explosion protection. The first part of the article deals with the general issue of explosion and the basic principles of explosion protection. Next, the article deals with explosive dusts and the explosive zones in which buildings are classified. The second part of the article describes the study itself, which deals with the calculation for the silo vents and the backflow forces that arise when dusts explode in the silo structure.

Key words: Explosion; silo; foundation; dusty material; ventilation openings.

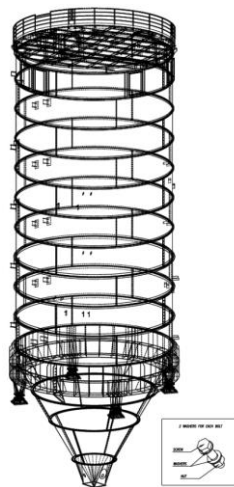
ÚVOD

Výbuch sila může být zapříčiněn různými příčinami, včetně nedostatečného řízení rizik, nedodržování bezpečnostních pravidel a postupů, vadných nebo špatně udržovaných zařízení nebo nebezpečných látek. Důležité je, aby byla věnována dostatečná pozornost prevenci výbuchu sila a zajištění bezpečnosti v jeho okolí.

Článek obsahuje informace ohledně konstrukcí sila, skladovaných materiálů a jejich potenciální hrozbou vedoucí ke vzniku exploze uvnitř sila. V příspěvku je popsáno teoretické řešení a posuzování dané problematiky.

SILO

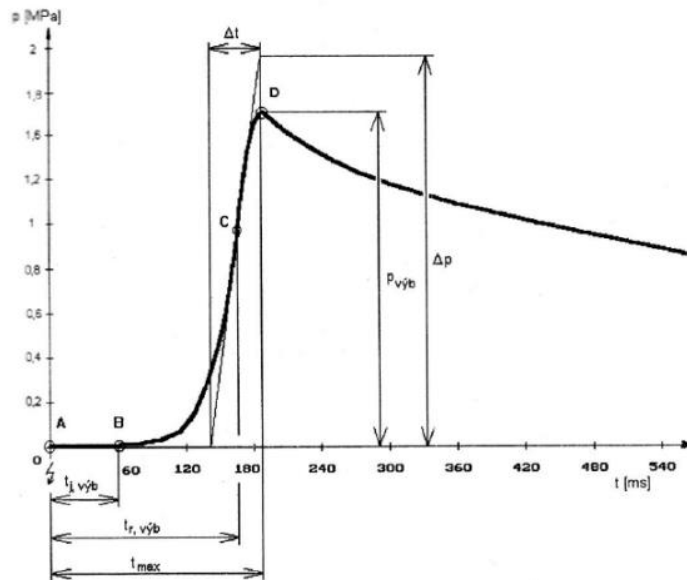
Silo je konstrukčně specializovaná stavba nebo nádrž určená pro hromadné skladování sypkých materiálů, jako jsou zemědělské produkty (obilí, krmiva), stavební materiály (cement, písek), chemikálie a další práškové či granulované látky. Sila jsou typicky vysoké a úzké, což optimalizuje využití prostoru a usnadňuje zásobování a vyprazdňování materiálů. Příklad konstrukce sila je znázorněn na obr. 1. Konstrukce sila může být z různých materiálů včetně oceli, betonu či plastu, přičemž výběr závisí na povaze uchovávaného materiálu a požadavcích na trvanlivost a bezpečnost. Jejich konstrukce zahrnuje pokročilé funkce jako jsou systémy pro kontrolu teploty a vlhkosti, ventilace a často i systémy pro potlačení výbuchu, které zabraňují možnému nebezpečí požáru či exploze způsobené akumulací prachových částic. [1]



Obr. 1 Konstrukce sila [2]
Fig. 1 Silo construction

VÝBUCH A JEHO ÚČINKY NA KONSTRUKCI SILA

Pro vznik výbuchu je nezbytné, aby se v prostoru nacházela jemně rozptýlená hořlavá látka ve směsi s oxidačním prostředkem v dostatečné koncentraci a byl přítomen silný iniciační zdroj. Tato hořlavá látka může být ve formě hořlavého plynu, páry, mlhy hořlavé kapaliny, rozvířeného hořlavého prachu, nebo jejich kombinace, což je označováno jako hybridní směs. Po zapálení této směsi dochází k exotermické reakci. V uzavřeném prostoru pak tento přebytek tepla způsobuje zvyšování tlaku. Časový průběh narůstání tlaku při výbuchu v závislosti na čase znázorňuje výbuchová křivka na obr. 2. [1] [3]



Obr. 2 Výbuchová křivka [1]

Fig. 2 Blast curve

Rozsah výbušnosti je definován dolní a horní mezí výbušnosti, které stanovují podmínky pro samostatné šíření výbuchu ve směsi. Dolní mez výbušnosti, která indikuje nedostatek hořlavé látky ve směsi s oxidačním prostředkem, je nezávislá na poměru kyslíku a dusíku ve směsi. Naopak, horní mez výbušnosti, signalizující nedostatek oxidačního prostředku, je silně závislá na obsahu kyslíku ve vzduchu. S růstem počátečního tlaku dochází ke zvýšení horní meze výbušnosti, zatímco dolní mez výbušnosti se snižuje jen mírně. S poklesem tlaku se rozsah výbušnosti zužuje a u některých směsí se oblast výbušnosti uzavře, což znamená, že při určitém podtlaku a dané iniciační energii k výbuchu nedojde. Proto může být podtlak považován za efektivní protivýbuchové opatření. [1]

Výbuch prachu v silu může mít devastující účinky na strukturu zařízení a bezpečnost okolního prostředí. Když je hořlavý prach přítomen v určité koncentraci a dojde k jeho zapálení iniciačním zdrojem, obvykle dochází k výbuchu. Rychlé uvolnění energie při výbuchu vede ke generování silného tlakového rázu a vysokých teplot, které mohou vážně poškodit konstrukci sila. Primárním důsledkem výbuchu prachu je náhlý nárůst tlaku v interiéru sila, který může překročit jeho konstrukční kapacity a vést k deformaci nebo dokonce kompletnímu zhroucení konstrukce. Teplo během výbuchu může vyvolat požáry, které mohou rychle eskalovat a způsobit rozsáhlé škody na síle a okolních objektech. [1]

INICIAČNÍ ZDROJE A PROTIVÝBUCHOVÁ OCHRANA

Iniciačním zdrojem daného hořlavého systému se může stát předmět nebo látka, které mají určitou teplotu a jsou schopny po určitou dobu odevzdávat potřebné množství energie příslušného druhu. [1] Iniciační zdroje lze klasifikovat do dvou hlavních kategorií: tepelné a elektrické.

Tepelné zdroje zahrnují vše od plamenů, žhavých povrchů až po jiskry vznikající třením nebo nárazem, které mohou dosáhnout teploty potřebné k zapálení hořlavých materiálů. Z hlediska bezpečnostních opatření je nezbytné rozpoznávat a kontrolovat potenciální iniciační zdroje v prostředích, kde jsou přítomny hořlavé materiály. [1]

U hořlavých prachů je vzácně možná náhrada za nevýbušný nebo méně výbušný prach. Skutečná koncentrace prachu ve vzduchu je ovlivněna poměrem mezi rozvířeným a usazeným prachem, přičemž udržování koncentrace pod dolní mezí výbušnosti je efektivní pouze pokud je koncentrace v zařízení nebo potrubí stálá, například za filtrem. Primární protivýbuchová ochrana se zaměřuje na prevenci vzniku výbušné atmosféry a eliminaci zdrojů zapálení. Omezení rozvíření prachu lze dosáhnout zkrápěním vodou nebo olejem, nebo hrubší granulací, pokud to podmínky dovolují. Sekundární prevence spočívá v odstraňování zdrojů iniciace, jako jsou látky a objekty schopné vyvolat zapálení. Terciální prevence je soubor opatření na minimalizaci škod a rychlou reakci po výbuchu, která zahrnuje ochranu životů, zdraví, majetku a obnovu provozu, a zabezpečení, aby konstrukce odolala dopadům výbuchu a rozptýlila energii. [3]

PRACH, JEHO CHARAKTERISTIKA A VÝBUCHOVÉ PARAMETRY

Prach může být jedním z běžných faktorů způsobujících průmyslové výbuchy a požáry, zvláště když hořlavé částice prachu jsou ve vzduchu v dostatečně vysoké koncentraci a jsou zapáleny iniciačním zdrojem. Každý typ prachu má své specifické výbuchové charakteristiky, které určují jeho potenciální nebezpečí. Parametry mnoha běžně se vyskytujících prachů jsou dobře dokumentovány, avšak u vzácnějších nebo speciálně smíchaných prachů je nezbytné experimentálně určit tyto charakteristiky. V prostředích, kde se vyskytuje prach, je klíčové zóny klasifikovat jako zónu 20, 21 nebo 22 na základě trvání potenciálně výbušné atmosféry. [1] [3]

STUDIE VÝBUCHU SILA

Pro výpočet se určí druh výbušných prachů, ke kterému je nutno znát nezbytné parametry. Jedním z hlavních parametrů pro výpočet je kubická konstanta K_{St} , kterou lze získat výpočtem dle normy ČSN EN 14491 [4] a to vztahem (1)

$$K_{St} = \frac{dp}{dt} \times V^{\frac{1}{3}} \text{ [bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1)$$

Dalším nezbytným parametrem je maximální výbuchový tlak p_{max} . Oba tyto parametry prachu jsou nezávislé na objemu nádoby, ve které jsou umístěné.

V Tab. 1 jsou uvedeny hodnoty těchto parametrů pro vybrané typy prachů.

Tab. 1 Seznam výbušných prachů a jejich parametry

Tab. 1. List of explosive dusts and their parameters

Název prachu	p_{max} [bar]	K_{St} [bar·m·s ⁻¹]
grafit	6,5	73
dřevný prach	9	102
hnědé uhlí	11	41

Nejdřív je nutné vypočítat plochu odvětrávacích otvorů. Tahle plocha může být při realizaci rozdělena na více otvorů, které budou umístěné na konstrukci sila. Při výbuchu dojde k odlehčení výbuchů pomocí odlehčovacích otvorů, co způsobí vystříknutí plamenů a spáleného materiálu mimo konstrukci. Prostor, do kterého plameny a materiál vystříkne musí být od sousedních provozů a technologií dostatečně vzdálen, aby se předešlo dalšímu hoření a výbuchu. Do prostoru nemůže být dovolen vstup osob v době nebezpečí výbuchu.

Při odlehčení konstrukce sila v důsledku proudění materiálu z odlehčovacích otvorů vznikají zpětné síly, které mohou způsobit deformaci odlehčené nádoby.

Postup výpočtu zpětných sil od výbuchu lze najít ve zdroji [5]

Maximální zpětná síla se určí ze vztahu (2).

$$FR_{max} = 119 \cdot A \cdot P_{red,max} \quad [kN] \quad (2)$$

kde:

FR_{max} je zpětná síla [kN]

A geometrická odlehčovací plocha [m²]

$P_{red,max}$ maximální redukovaný výbuchový tlak [bar]

Na základě výsledků výpočtu zpětných sil lze následně navrhnout podpůrné konstrukce sila. Tento návrh bude řešen v navazující diplomové práci.

ZÁVĚR

V této práci je teoreticky popsáno, co je silo, co je výbuch a jaké jsou jeho účinky na konstrukci sila. Základem této práce byl výpočet odvětracích otvorů daného sila, jehož parametry byly poskytnuty společností McDermott [6]. V navazující diplomové práci bude řešena podpůrná konstrukce a taky samotná konstrukce sila v rámci protivýbuchové ochrany. Důvodem zpracování této práce je problém návrhu podpůrných konstrukcí. Tyto konstrukce jsou často zbytečně předimenzované, nebo naopak nemají dostatečnou tuhost, což způsobuje zřícení konstrukcí sila při explozi.

PODĚKOVÁNÍ

Práce byla zpracována v spolupráci s firmou McDermott, která poskytla informace a podklady ohledně řešené problematiky protivýbuchové ochrany konstrukce sila.

LITERATURA

- [1] DAMEC, Jaroslav. *Protivýbuchová prevence v potravinářství a zemědělství*. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 1999. ISBN 80-86111-41-5.
- [2] MCDERMOTT, Interní podklady zasláné emailem, 2024
- [3] DAMEC, Jaroslav. *Protivýbuchová prevence*. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 1998. ISBN 80-86111-21-0.
- [4] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN 14491 (38 9682) - Ochranné systémy pro odlehčení výbuchu prachu. B.m.: ÚNMZ. únor 2013.
- [5] ŠTROCH, P.: 2007. Riziko výbuchu prašných směsí a možnosti prevence. 1. vyd. Praha. AMOS repro, spol. s r.o., 2007. 80 s. ISBN 978-807362-515-3.
- [6] ECKHOFF, Rolf K. *Dust Explosions in the Process Industries*. 3rd edition. Amsterdam: Gulf Professional Publishing, 2003. 719 p. ISBN 9780750676021.

TEPLOTNÍ ANALÝZA OSTĚNÍ TUNELOVÝCH STAVEB TEMPERATURE ANALYSIS OF TUNNEL LINING STRUCTURES

Bc. Aneta Teplá

Abstract

This article addresses the thermal analysis of tunnel lining structures using numerical modeling. A key element is the development of a database of tunnel cross-sections that enables the efficient selection and specification of geometric characteristics of tunnel constructions. The study includes detailed parameterization of tunnel profiles and the integration of temperature models from external sources, such as normative fire curves or the Fire Dynamics Simulator (FDS), for simulating various fire scenarios. The importance of material properties and fire models in relation to the thermal behavior of concrete tunnels facilitate better prediction of structural responses in extreme conditions.

Key words: Tunnel lining; Cross section of the tunnel; Fire; Heat conduction; Numerical modeling; Heat transfer; Thermal analysis

ÚVOD

Tunelové stavby jsou neodmyslitelnou součástí dopravní infrastruktury, přičemž jejich bezpečnost a funkčnost jsou klíčové pro veřejnou dopravu. Z obecné definice se jedná o stavby liniového podzemního charakteru, kterými prochází komunikace, umožňující plynulou a bezpečnou jízdu vozidel podcházením horských masivů, vodních překážek, osídlených oblastí, kulturně-historicky či ekologicky cenných území apod.; vyznačuje se uzavřeným příčným profilem [1].

Z hlediska inženýrského přístupu je zásadní pochopení teplotního chování materiálů, zvláště v kontextu požární bezpečnosti. Tato studie se zaměřuje na vývoj a analýzu databáze geometrických profilů tunelů, což umožňuje detailní simulace teplotních vlastností ostění v různých požárních scénářích, včetně extrémních situací. Výzkum zdůrazňuje význam numerického modelování pro optimalizaci návrhu a provozu tunelových staveb.

TUNELOVÉ STAVBY

Tunelové stavby lze rozdělit podle způsobu výstavby na ražené, hloubené a budované zvláštními způsoby výstavby. Metoda zhotovení tunelu přímo souvisí tvarem příčného profilu, stejně jako typ dopravy, který bude tunelovou stavbou veden, a další směrodatné faktory. Nejčastějšími typy tunelů jsou [2] [3]:

- Kruhový průřez – disponuje schopností efektivně odolávat tlaku z okolní zeminy. Je ideální pro hluboké tunely a tunely v náročných geologických podmínkách, jako jsou především metrové tunely.
- Obloukový průřez – má zakřivený horní segment a vertikální boční stěny, což jej činí vhodným pro mělké tunely, kde je třeba odolávat vertikálnímu zatížení. Tento průřez je často využíván u silničních tunelů.
- Průřez ve tvaru koňské podkovy je kompromisem mezi kruhovým a obloukovým průřezem a je vhodný pro různé typy dopravních tunelů, kde jsou specifické požadavky na vertikální prostor.
- Klenbový průřez – podobá se obloukovému, ale má více zakřivené boční stěny, které se setkávají u základu tunelu. Tento tvar umožňuje lepší rozložení zatížení a je vhodný pro tunely v oblastech s vysokým tlakem z horninového masivu.

- Obdélníkový průřez je typický pro mělké tunely nebo tunely s proměnlivými geologickými podmínkami. Díky své formě umožňuje efektivní využití prostoru, což je ideální pro dopravní a služební tunely.
- Dvojitý nebo trojitý kruhový průřez obsahuje více paralelních tunelů, které mohou být vřazeny vedle sebe nebo nad sebou. Tento typ je využíván ve složitých dopravních systémech, jako jsou některé metrové systémy, kde paralelní tunely slouží pro různé směry dopravy nebo různé typy dopravy.

TEPLENĚ TECHNICKÉ VLASTNOSTI BETONU

Teoretická analýza teplotního pole konstrukce je definována základní rovnicí vedení tepla, kdy je popsáno příslušné chování materiálu za tepelného namáhání pomocí tří veličin: součinitel tepelné vodivosti λ , měrná tepelná kapacita c a objemová hmotnost ρ . Tyto veličiny jsou dále popsány vztahy, kterými se vyjadřuje vztah těchto veličin a jejich vývoj vzhledem k rostoucí teplotě. [4]

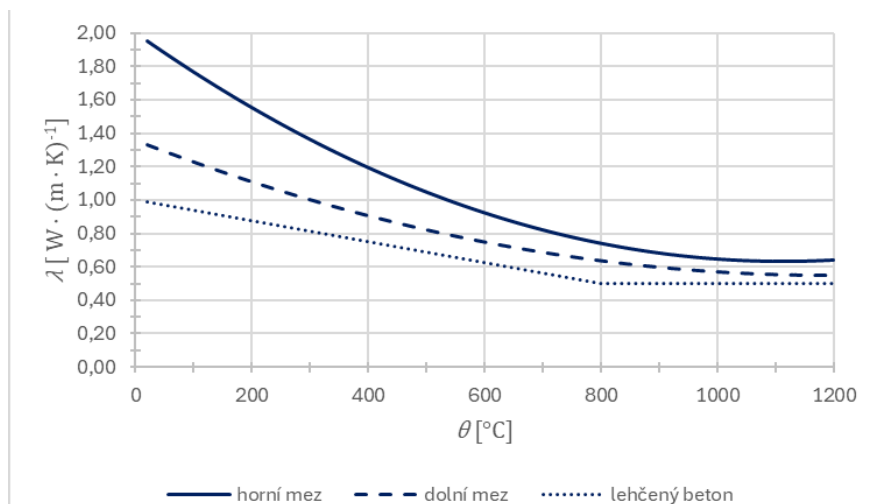
Tepelná vodivost λ

Také známá jako součinitel vedení tepla, je definována jako množství tepla, procházející jednotkou plochy s rovnoměrnou teplotou za jednotku času a na jednotku teplotního gradientu. Jednotka tohoto součinitele se po úpravě vyjadřuje jako $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$.

Obecně je součinitel tepelné vodivosti výrazně ovlivněn množstvím vody, která je obsažená ve směsi betonu. Výrazný vliv má také charakter použitého kameniva a jeho minerální složení, krystalický charakter a pórovitost. Za běžné teploty se může tepelná vodivost různých druhů kameniva lišit i o stovky procent. Se zvyšující se teplotou ale součinitel tepelné vodivosti klesá. Jedná-li se o kamenivo s vysokou pórovitostí či o porézní materiál, je hodnota součinitele tepelné vodivosti mnohem nižší než u jiného kameniva. [4]

V normě [6] se pro beton uvádí dva modely tepelné vodivosti – horní a dolní mez. Ve výpočtu pro lehký beton je uvažováno s výchozí hodnotou λ_0 dle [7]; $\lambda_0 = 1 W \cdot (m \cdot K)^{-1}$.

Na Obr. 1 je zobrazen průběh součinitele tepelné vodivosti λ v závislosti na teplotě.



Obr. 1 Průběh hodnot součinitele λ v závislosti na teplotě

Fig. 1 The progression of the λ coefficient values depending on temperature

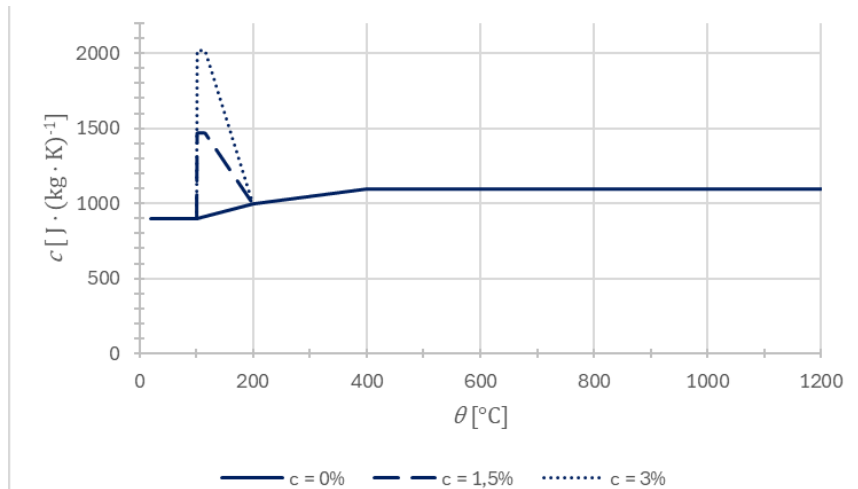
Měrná tepelná kapacita c

Definice měrné tepelné kapacity je udána jako množství tepla, absorbovaného na jednotku hmotnosti materiálu, aby teplota materiálu stoupla o jeden Kelvin. Veličinu lze vyjádřit jako $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$.

Postupně, se zvyšující se teplotou, má měrná tepelná kapacita tendenci být stále stabilní až do teploty 100 °C, kdy dochází k přeměně vody, obsažené v betonu, z kapalného na plynné skupenství.

Při tomto jevu dochází k absorpci velkého množství tepla a jako důsledek je znázorněn vysoký skok v grafu, uvedeného na Obr. 2 [4, 5].

Průběh hodnot měrné tepelné kapacity v závislosti na teplotě popisují rovnice, uvedené v [6].



Obr. 2 - Průběh hodnot součinitele c v závislosti na teplotě

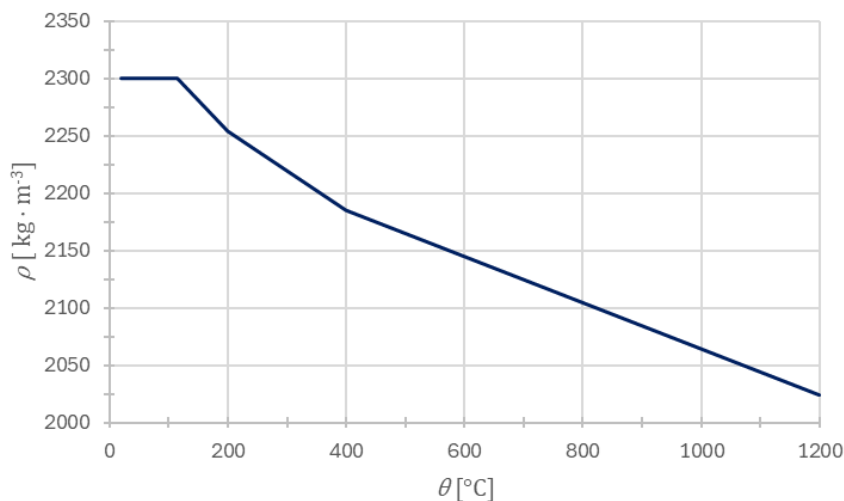
Fig. 2 - The progression of the c coefficient values depending on temperature

Objemová hmotnost ρ

Objemová hmotnost se definuje jako množství či hmotnost materiálu na jednotku objemu, základní jednotka je $kg \cdot m^{-3}$.

Za zvyšující teploty se objemová hmotnost mění, respektive postupně klesá, což je především při počátku zahřívání materiálu, kolem hodnoty 100 °C, kdy dochází k odparu vody, která je chemicky vázaná ve směsi betonu. To má za následek zvětšování objemu a snižování hmotnosti betonu. [4] [5]

Posloupnost tohoto vývinu zachycuje následující ilustrativní zobrazení vývoje hodnot hustoty betonu pro $\rho_0 = 2300 kg \cdot m^{-3}$ vyobrazuje Obr. 3.



Obr. 3 - Průběh hodnot objemové hustoty ρ v závislosti na teplotě

Fig. 3 - The progression of the volumetric density ρ values depending on temperature

MODELÝ POŽÁRU - POŽÁRNÍ SCÉNÁŘE

Tunelové stavby jsou z hlediska teplotní analýzy podrobeny značným výzvám, zejména kvůli extrémním podmínkám, které mohou nastat při požárech. Účinky požáru na konstrukci tunelu lze

zohledňovat pomocí různých modelů, ať už se jedná o modely zjednodušené, jako jsou teplotní křivky, zónové nebo zpřesněné CFD modely. [4]

PARAMETRIZACE PŘÍČNÉHO PRŮŘEZU V JAZYCE PYTHON

Pro účely vytvoření databáze příčných průřezů tunelů budou analyzovány různé typické tunelové profily, které odpovídají běžně používaným konstrukčním řešením. Geometrie těchto profilů bude zjednodušená za účelem jejich efektivní implementace do softwaru, což umožní nejen výběr specifického typu průřezu, ale i detailní upřesnění jeho geometrických charakteristik. Mezi tyto parametry patří šířka a výška tunelu, tloušťka ostění a jednotlivých vrstev v profilu, stejně jako podélná délka tunelu.

Součástí databáze bude rovněž knihovna materiálových vlastností a scénářů pro simulaci požárních situací, včetně různých typů požárních křivek a možnosti integrace vlastních teplotních modelů, například z programu Fire Dynamics Simulator (FDS).

V rámci zpracování databáze dojde k parametrizaci a simplifikaci jednotlivých průřezů, které následně budou implementovány do vývojového prostředí Python, kde proběhne jejich dělení s využitím metody konečných prvků.

ZÁVĚR

Vývoj databáze příčných průřezů tunelů a její aplikace v numerickém modelování poskytly nové možnosti pro analýzu teplotního chování tunelových konstrukcí. Integrace různých teplotních modelů, jako je FDS, a materiálových charakteristik zvýšila přesnost předpovědí a umožnila detailní hodnocení rizik spojených s požárními scénáři. Studie tak přispívá k lepšímu pochopení vlivu extrémních teplot na bezpečnost tunelů a podporuje vývoj pokročilých metod pro návrh a řízení tunelových staveb ve snaze zvyšovat jejich bezpečnost a efektivitu.

LITERATURA

- [1] ČSN 73 7507 Projektování tunelů pozemních komunikací. B.m.: ÚNMZ. prosinec 2013
- [2] MAIDL, Bernhard, Markus THEWES, Ulrich MAIDL a David STURGE. Handbook of tunnel engineering. Berlin: Ernst & Sohn, 2013. ISBN 978-3-433-03048-6.
- [3] CHAPMAN, David, Nicole METJE a Alfred STÄRK. Introduction to tunnel construction. Second edition. Boca Raton London New Yorkj: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018. Applied geotechnics. ISBN 978-1-4987-6624-1.
- [4] GUO, Zhenhai a Xudong SHI. Experiment and calculation of reinforced concrete at elevated temperatures. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann, 2011. ISBN 978-0-12-386962-3.
- [5] ŠTEFAN, Radek, Marek FOGLAR, Josef FLÁDR, Kateřina HORNÍKOVÁ a Jakub HOLAN. Thermal, spalling, and mechanical behaviour of various types of cementitious composites exposed to fire: Experimental and numerical analysis. Construction and Building Materials [online]. 2020, 262, 119676 [vid. 2024-05-19]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119676
- [6] ČSN EN 1992-1-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru. B.m.: ÚNMZ. listopad 2006
- [7] ČSN EN 1994-1-2 (731470) Eurokód 4: Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru. B.m.: ÚNMZ. prosinec 2006

POŽÁRNÍ BEZPEČNOST SILNIČNÍCH TUNELŮ SE ZAMĚŘENÍM NA VĚTRÁNÍ FIRE SAFETY OF ROAD TUNNELS WITH A FOCUS ON VENTILATION

Bc. Pavel Moucha

Abstract

This paper presents the fire safety of road tunnels with a focus on ventilation. The current state of knowledge of fire safety design of road tunnels is described. Part of the text is directly devoted to the correct design of the ventilation system and its subsequent effect on fire. In the practical part, the first stage of CFD model simulations is started. The aim is to determine, through CFD models, the extent to which existing nominal temperature curves for road tunnels can be used. At the same time, where the applicability of the CFD models outweighs the temperature curves, an attempt is made to reduce the computational complexity of the simulations.

Key words: Fire Safety; Road Tunnel; Fire Modelling; Ventilation; Fire Spread.

ÚVOD A MOTIVACE

V posledních desetiletích je věnována značná pozornost požární bezpečnosti silničních tunelových staveb, především z důvodu rychlého nárůstu této části dopravní infrastruktury v moderním urbanizovaném světě, a současně množství závažných incidentů z pohledu požární bezpečnosti, s tím spojených. Ze statistického pozorování sice vyplývá řádově nižší četnost mimořádných událostí s následným požárem (výbuchem či únikem nebezpečných látek) v silničních tunelech oproti otevřeným pozemním komunikacím (event. i v porovnání s uzavřenými prostory budov), specifická rizikovitost silničních tunelů ovšem v konečném důsledku eskaluje do značně závažných negativních dopadů, které se přímo promítají do evakuace (a případných úmrtí) osob, enormního zatížení konstrukcí ostění tunelů během požáru, a dále i do často ztížených (v krajním případě dokonce znemožněných) požárních zásahů. [1, 2]

Hlavní rizika v podobě extrémních teplot a kouře včetně následného šíření mohou být zásadně ovlivněny správně navrženým systémem větrání.

LEGISLATIVA A POŽÁRNÍ BEZPEČNOST SILNIČNÍCH TUNELŮ

Pro navrhování silničních tunelových staveb platí především ČSN 73 7507 *Projektování tunelů pozemních komunikací* a TP 98 *Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací*. Ve vazbě na větrání rozšířeno Metodickým pokynem Ministerstva dopravy České republiky *Větrání silničních tunelů: Volba systému, navrhování, provoz a zabezpečení jakosti větracích systémů silničních tunelů*. Délka tunelu a intenzita dopravy jsou klíčové parametry ovlivňující návrh, zejména v oblasti technologického vybavení tunelu – hovoříme o 4 bezpečnostních kategoriích TA, TB, TC a TD (včetně 2 navazujících podkategorií TC-H a TD-H). [3]

Z pohledu požární bezpečnosti se požární úseky silničních tunelů zařazují do V. stupně požární bezpečnosti (krátké tunely do 300 m) nebo do VII. stupně požární bezpečnosti (střední tunely s délkou 300 – 1 000 m a dlouhé tunely nad 1 000 m). V souladu s ustanovením Vyhlášky MV č. 246/2001 Sb. se silniční tunelové stavby s délkou nad 350 m považují za objekty se složitými podmínkami pro zásah a požaduje se vypracování dokumentace zdolávání požáru. Silniční tunely nad 1 000 m se považují za stavby kategorie III ve smyslu Vyhlášky č. 460/2021 Sb.

VĚTRÁNÍ SILNIČNÍCH TUNELŮ

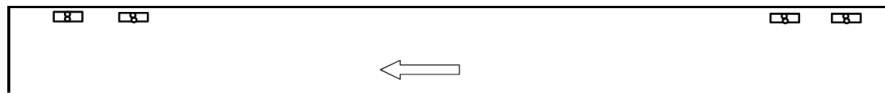
V tunelech je větrání zajištěno přirozeně nebo nuceně – tzv. provozním a havarijním větráním, nebo kombinací. Při vzniku mimořádné události dochází k aktivaci havarijního větrání, jehož úko-

lem je odtah nebo usměrnění horkého kouře, plynů a zplodin hoření tak, aby byla zajištěna bezpečná a včasná evakuace osob z prostoru tunelu a následně umožněn požární zásah jednotek HZS.

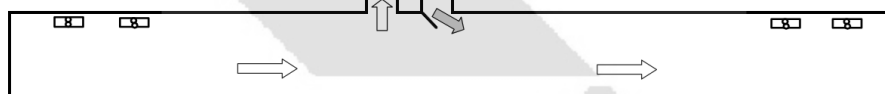
Požadavky na havarijní větrání jsou stanoveny na základě 3 hlavních kategorií tunelů označovaných jako T1, T2 a T3, viz dále. Do kategorie T1 jsou zařazeny silniční tunely s jednosměrným provozem a současně nízkou pravděpodobností vzniku kongesce – jedná se o standardní tunely na dálniční dopravní síti. Kategorii T2 představují silniční tunely opět s jednosměrným provozem, ovšem s velkou pravděpodobností vzniku kongesce – zejména tunely městských okruhů. Kategorii T3 zastupují silniční tunely s obousměrným provozem bez ohledu na kongesce. [3, 4]

Účelem větrání silničních tunelů ve smyslu požadavků TP 98 je zabezpečení koncentrace škodlivin ve vzduchu v mezích nejvyšších přípustných koncentracích nejnebezpečnějších látek, se zřetelem na dobu pohybu osob v tunelu a ve smyslu hygienických předpisů; dále zajištění dobré viditelnosti pro průjezd vozidel při znečištění tunelového vzduchu emisemi výfuků vznětových motorů s ohledem na povolenou rychlost vozidel; dále snížení účinku kouře a tepla při požáru na osoby nacházející se v tunelu včetně složek integrovaného záchranného systému (IZS); a v neposlední řadě řízení rozptylu škodlivých látek ve vzduchu způsobených exhalacemi vozidel do okolí tunelu, a tím snížení imisního zatížení okolí.

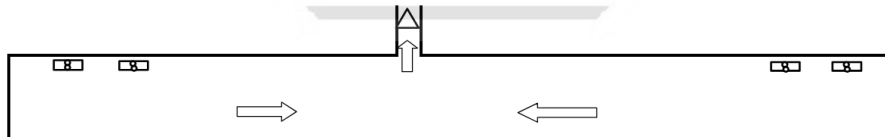
Výše zmiňovaným Metodickým pokynem Ministerstva dopravy České republiky jsou definovány druhy havarijního, resp. požárního větrání silničních tunelů (Obr. 1 až 5).



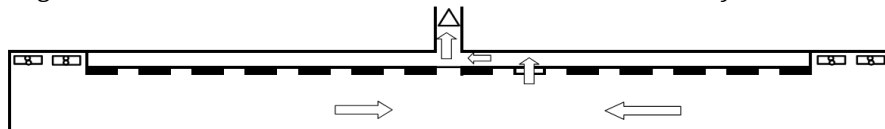
Obr. 1 Požární větrání – průběžné podélné
Fig. 1 Longitudinal continuous fire ventilation



Obr. 2 Požární větrání – podélné větrání s výměnou vzduchu
Fig. 2 Longitudinal fire ventilation with air exchange



Obr. 3 Požární větrání – koncentrované příčné odsávání v pevně daném místě
Fig. 3 Fire ventilation – concentrated cross extraction in a fixed location



Obr. 4 Požární větrání – nastavitelné příčné odsávání
Fig. 4 Fire ventilation – adjustable cross extraction



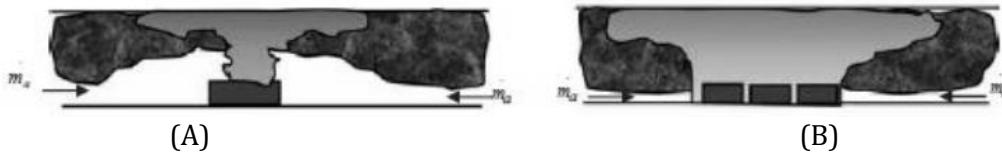
Obr. 5 Požární větrání – příčné lineární
Fig. 5 Cross linear fire ventilation

VLIV VĚTRÁNÍ NA POŽÁR V SILNIČNÍM TUNELU

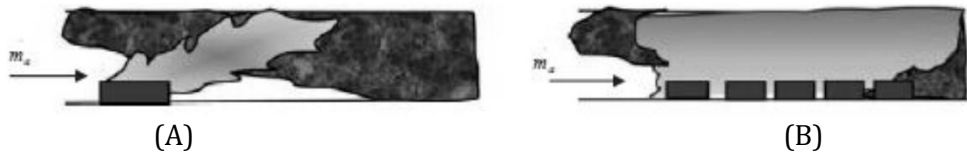
Způsob větrání má z pohledu požární bezpečnosti silničních tunelů zásadní vliv na rozvoj požáru a proces spalování (Obr. 6 a 7) – interakce požáru s prouděním vzduchu v tunelu může způsobit značné aerodynamické změny, ať už v podobě přiškrcení toku vzduchu v souvislosti se vztlakovými efekty nebo zpětného proudění kouře a horkých plynů (z anglického *back-layering*). Toto se vztahuje i k tunelům s výhradně přirozeným větráním, kde omezení přívodu vzduchu k požáru

má za následek neudržení dokonalého spalování, což vede k nárůstu produkce oxidu uhelnatého, přičemž veškerý přiváděný kyslík je požárem spotřebován. [2, 3]

Tyto případy představují zásadní riziko z hlediska možného poměrně rychlého zakouření značné části prostoru tunelu s případným dopadem na evakuaci osob a následný požární zásah – správná volba systému větrání je klíčová, v opačném případě může mimořádná událost vyústit až v katastrofální následky. Tunely jsou obvykle vybaveny nuceným větráním – správná dimenze (výkon) systému se stanovuje v souladu se zmiňovaným Metodickým pokynem Ministerstva dopravy ČR.



Obr. 6 Tunel s přirozeným větráním: (A) Požár řízený palivem; (B) Požár řízený ventilací
Fig. 6 Tunnel with natural ventilation: (A) Fuel-controlled fire; (B) Ventilation-controlled fire



Obr. 7 Tunel s nuceným větráním: (A) Požár řízený palivem; (B) Požár řízený ventilací
Fig. 7 Tunnel with forced ventilation: (A) Fuel-controlled fire; (B) Ventilation-controlled fire

Horký kouř produkovaný požárem se v závislosti na směru a síle proudění vzduchu (ve vazbě na použitý systém větrání) pohybuje od místa požáru na jednu nebo obě strany u stropní konstrukce ostění tunelu rychlostí v jednotkách metrů za sekundu, současně u vozovky dochází k tvorbě vrstvy čerstvého vzduchu, který je přiváděn k požáru. Pokud klesne rychlost proudění pod kritickou mez, dochází k šíření kouře do obou směrů. Čím dále od ohniska požáru kouř putuje, tím více se ochlazuje a ředí – v případě, že není dostatečně nebo dokonce vůbec odváděn prostřednictvím ventilačního systému, dochází k jeho poklesu a celkovému zakouření prostoru tunelu. [3]

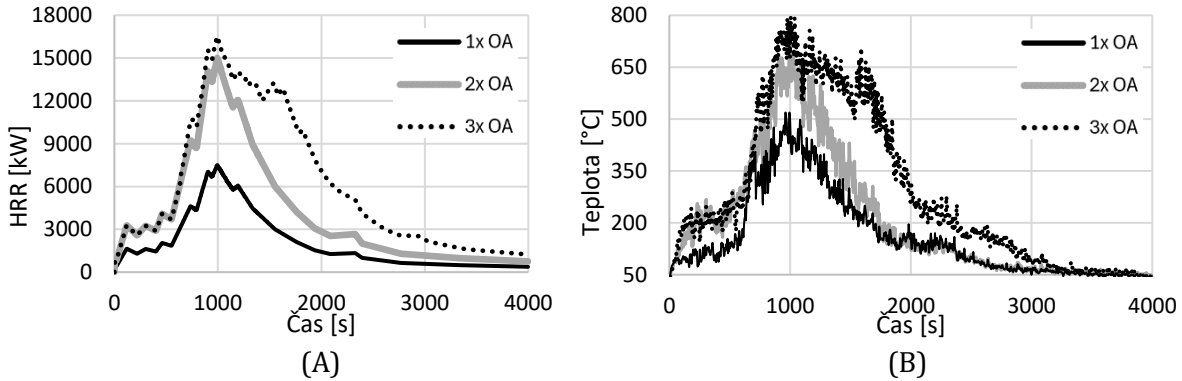
Množství produkovaného kouře je závislé na rychlosti uvolňování tepla (z anglického *HRR* – *heat release rate*). V rámci studií byla odvozena až 4 násobně vyšší rychlost uvolňování tepla při požáru v tunelu oproti požáru totožného materiálu v otevřeném venkovním prostoru. [1, 5]

ŘEŠENÝ PŘÍKLAD

Byl vytvořen CFD model silničního tunelu (dálniční dvoupruhový, délky 500 m) za účelem analýzy závislosti požárního zatížení a volby příslušného druhu větrání na průběh požáru. V první fázi byly analyzovány 3 referenční požáry osobních automobilů (OA) ve vazbě na přirozené větrání prostoru tunelu s rychlostí proudění vzduchu 1,5 m/s. S ohledem na požární zatížení byly požáry definovány chemickou reakcí polyuretanu – konkrétně $C_{1.0}H_{1.8}O_{0.17}N_{0.17}$. Během všech simulací bylo pozorováno zpětné proudění kouře (zmiňovaný *back-layering*), a to v délce až 70 m (Obr. 8). Simulace byly zaměřeny na požáry jednotlivých vozidel i skupiny (simulující kolizi OA). Ve všech 3 případech referenčních požárů OA byly vypočtené průběhy HRR CFD modelem (programem *Fire Dynamics Simulator*) totožné s vloženými (vycházejícími z experimentů [1, 2]) – viz průběhy HRR níže (Obr. 9). V tunelu byly v pravidelné prostorové síti (o straně 1,0 m) do vzdálenosti 10 m od středu ohniska požáru osazeny teplotní čidla (prostorová i povrchová), doplněny stejným měřením (po 5 m) i v navazující části tunelu. Teplota plynů (ve výškové úrovni 3,5 m nad vozovkou, 5 m od středu ohniska požáru po směru primárního proudění kouře tunelem) dosahovala v průměru až 520 °C, resp. až 660 °C a 800 °C – viz průběhy teplot plynů jednotlivých simulací níže (Obr. 9). Přenos požáru mezi OA je řešen prostřednictvím pneumatik vozidel ve vazbě na jejich teplotu vznícení (uvažováno 350 °C).



Obr. 8 Grafické vykreslení zpětného proudění kouře
Fig. 8 Graphic rendering of smoke back-layering



Obr. 9 Požáry osobních automobilů: (A) HRR; (B) Průměrná teplota plynů (pozice viz výše)
Fig. 9 Passenger car fires: (A) HRR; (B) Average gas temperature (position see above)

Navazující části výzkumu nejsou s ohledem na dlouhou výpočetní náročnost simulací doposud prezentovány – bude se jednat o simulace nuceného havarijního větrání ve spojitosti s požáry nákladních vozidel (nad 12 t) a následný dopad na teplotní průběhy během požáru (vazba na stávající nominální teplotní křivky). Současně bude prováděna analýza výpočetního času jednotlivých modelů a možná optimalizace – zkrácení výpočtu s minimalizací dopadu na výstupy.

ZÁVĚR

Návrh požární bezpečnosti silničních tunelových staveb je s ohledem na nespočet vstupních parametrů značně obtížný. Požární zkoušky jsou z důvodu enormních materiálních a finančních nákladů ojedinělé. Cílem je prostřednictvím CFD modelů stanovit rozsah využití stávajících nominálních teplotních křivek pro silniční tunely. Současně tam, kde využitelnost CFD modelů převažuje nad teplotními křivkami, je snaha o snížení výpočetní náročnosti simulací, to vše se zahrnutím vlivu větrání na průběh požáru.

LITERATURA

- [1] INGASON Haukur, Ying Zhen LI a Anders LÖNNERMARK. *Tunnel Fire Dynamics* [online]. New York, NY: Springer New York, 2015. ISBN 978-1-4939-2198-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4939-2199-7 [citováno 2024-05-02].
- [2] LI Zhen Ying, INGASON Haukur. *Overview of research on fire safety in underground road and railway tunnels*. ScienceDirect – Tunnelling and Underground Space Technology 81. 2018. Dostupné z: doi:10.1016/j.tust.2018.08.013. [citováno 2024-05-02].
- [3] BŘESKÁ Pavla. *Modelování požáru v silničním tunelu*. Diplomová práce. Vedoucí práce: KUČERA Petr. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. 2009/2010. Dostupné z: www.vsb.cz/personCards/theses.jsp?login=kuc05&lang=en. [citováno 2024-05-02].
- [4] SVOBODOVÁ Nicole. *Využití zónových modelů požáru při modelování požáru v tunelech*. Odborný článek. Školitel: NOVÁK Josef. ČVUT – Fakulta stavební. 2021. Dostupné z: www.concrete.fsv.cvut.cz/phdworkshop/.../Svobodova_Nicole.pdf. [citováno 2024-05-02].
- [5] HLAVÁČEK Miroslav. *Modelování požáru v tunelech pomocí zjednodušených a zpřesněných modelů požáru*. Diplomová práce. Martin Benýšek (vedoucí práce). ČVUT – Fakulta stavební. 2023/2024. Dostupné z: www.dspace.cvut.cz/handle/10467/2966. [citováno 2024-05-02].

ROZVOJ KOUŘE A EVAKUACE PŘI POŽÁRU V ŽELEZNIČNÍM TUNELU

DEVELOPMENT OF A SMOKE AND EVACUATION IN CASE OF A FIRE IN A RAILWAY TUNNEL

Bc. Miroslav Miklas

Abstract

The paper focuses on the issue of fire safety in railway tunnels. It deals with construction types of railway tunnels. A part of the paper is also devoted to fire behaviour in tunnels, including historical cases of fires in railway tunnels, train car fires and large-scale fire tests of carriages. In the next section, fire models commonly used for design of railway tunnels are presented, including simplified analytical models and advanced computational procedures. In the second part of the paper, a model of the Nová Dubeč railway tunnel is presented, which is created with the Fire Dynamic Simulator software. The decrease of the neutral plane of smoke is investigated and conclusions for safe evacuation of people from the tunnel are drawn.

Key words: fire, tunnel, safety, numerical model, smoke development, FDS

ÚVOD

Železniční doprava v současné době prochází výrazným rozvojem díky evropským dotacím a implementaci nových technologií. Tento rychlý pokrok vede k plánování a výstavbě železničních tunelů, které významně překračují dosavadní české standardy. Tento trend je zčásti motivován potřebou přizpůsobit se požadavkům evropských koridorů a zlepšit efektivitu železniční dopravy.

V souvislosti s geografickým umístěním České republiky jako klíčové křižovatky evropských tranzitních koridorů je nezbytné modernizovat železniční tratě, aby splňovaly evropské standardy pro železniční dopravu. To zahrnuje i výstavbu nových, delších a moderních tunelů. K roku 2023 má ČR 169 železničních tunelů o celkové délce 55 942 m. V současnosti je nejdelší Ejpovický tunel s provozní délkou 4150 m. [1]

POŽÁRNÍ BEZPEČNOST V ŽELEZNIČNÍCH TUNELECH

Bezpečnost železniční dopravy obecně a bezpečnost železniční dopravy v tunelech obzvláště je záležitostí multidisciplinární a interdisciplinární. Na tuto problematiku lze nahlížet z různých pohledů a perspektiv a stejně tak bohaté je množství přístupů, které lze zohlednit při koncepčních volbách sloužících k zajištění nezbytně nutné, požadované, optimální nebo i nadstandardní úrovně bezpečnosti provozované dopravy.

Železniční doprava má oproti silniční dopravě, která je její hlavní konkurentkou, v oblasti bezpečnosti několik stěžejních výhod. Je to především výrazně větší direktivnost, absolutní profesionalita z hlediska osob zabývajících se výkony souvisejícími s provozováním dopravy a provozováním dráhy a především výraznější regulace pohybu dopravních prostředků po dopravní cestě. Tyto výhody železniční dopravy z hlediska bezpečnosti jsou zároveň nevýhodami z pohledu konkurenceschopnosti, protože železniční dopravu nezanedbatelným způsobem zdražují. Zároveň jsou však pro provozování železniční dopravy nezbytným předpokladem již od doby jejího vzniku. Zajímavostí je, že naprostá většina významnějších nehod, které železniční dopravu provázejí, se děje na úrovních styčných dráhy a pozemní komunikace, na železničních přejezdech, v naprosté většině zaviněním nezodpovědných řidičů nedodržujících pravidla provozu na pozemních komunikacích.

Z hlediska tunelů je podstatné, že veškerá pozitiva železniční dopravy se příznivě projevují i na úrovni bezpečnosti dopravy v železničních tunelech. Střety na přejezdech jsou pro tyto objekty irelevantní, a tak samotná pravděpodobnost vzniku mimořádné události v tunelu odvozená

z četnosti mimořádných událostí na železniční síti České republiky je relativně malá. Tato pravděpodobnost pochopitelně roste s rostoucí délkou tunelové trouby. S ohledem na charakter naší železniční sítě a délky stávajících tunelů lze úroveň bezpečnosti dopravy v nich považovat za standardní. V současné době je však ve fázi projekční přípravy celá řada nových tunelů, které svou délkou výrazně přesahují provozované tunely. I z tohoto důvodu je problematice bezpečnosti v železničních tunelech věnována velká pozornost jak ze strany provozovatele dráhy a drážní dopravy, kterými jsou České dráhy, a. s. (ČD), tak ze strany vlastníka železniční infrastruktury a investora, kterým je Správa železniční dopravní cesty, s. o. (SŽDC). [2]

HISTORIE POŽÁRŮ V ŽELEZNIČNÍCH TUNELECH

V železničních tunelech požáry často souvisejí s technickou závadou na kolejových vozidlech, ať už na strojním zařízení lokomotivy, v prostoru restaurace, elektrickém systému, ventilačním systému nebo se žhářstvím. Tyto požáry jsou často zpozorovány cestujícími nebo personálem a mohou být řešeny přímo. Pokud požár vznikne zvenčí, může být příčinou porucha v hydraulických systémech (netěsnost, rozstřík apod.) nebo přehřátí brzd. Takové požáry je obtížnější odhalit a obvykle je není možné hasit před zastavením vlakové soupravy. Po úplném zastavení se tyto požáry mohou rozvinout poměrně rychle. V některých případech je příčinou vzniku požáru souběh událostí. Zvláštní pozornost vyžadují nákladní vlaky, kde je sice velmi málo členů posádky, ale potenciál vzniku požáru s dlouhým trváním je vyšší. Hašení požárů v kolejových vozidlech je velmi obtížné a vytváří obrovský tlak na záchranné složky. Místo železniční nehody může být také obtížně dostupné. V případě požáru nákladních vlaků s cisternami s palivem nebo nákladních vozidel, při kterých je uvolňováno velké množství tepla do okolí, je hlavním důsledkem požáru poškození konstrukce tunelu, podobně jako v případě požáru silničního tunelu. V případě požáru osobních vlaků nejsou hlavním důsledkem zpravidla škody na konstrukci tunelu, ale počet potenciálních obětí. Přehled vybraných příkladů historických požárů v železničních tunelech je uveden v Tabulce 1.

Tab. 1 Historické požáry v železničních tunelech

Tab. 1 Historic fires in railway tunnels

Rok	Název tunelu	Stát	Délka tunelu [km]	Příčina požáru	Následky
2008	Eurotunel	VB/Francie	51	požár vagonu	na konstrukci
2000	Kitzsteinhorn	Rakousko	3,3	únik oleje	155 úmrtí
1999	Salerno	Itálie	9	žhářství	4 úmrtí
1996	Eurotunel	VB/Francie	51	žhářství	34 zraněných
1991	Dayasoshan	Čína	14,3	cigareta	12 úmrtí
1976	Baocheng	Čína	0,9	vykolejení	75 úmrtí

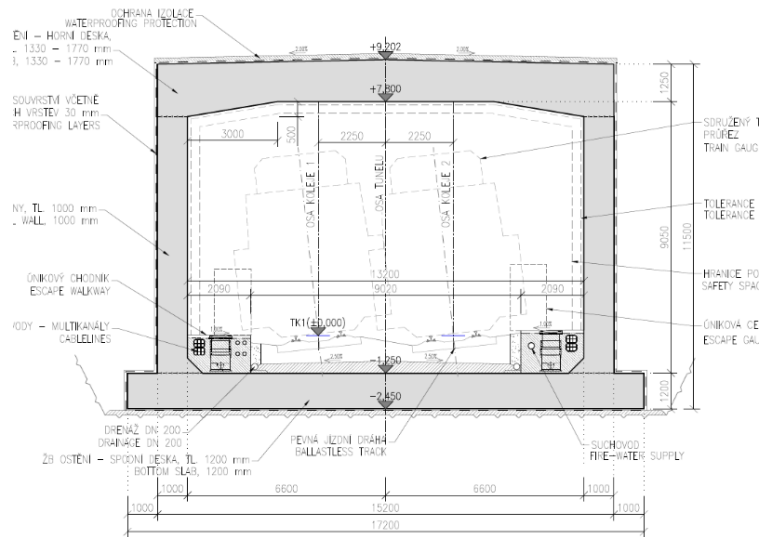
MODELY POŽÁRU V ŽELEZNIČNÍCH TUNELECH

Pro stanovení teplot a dalších parametrů pro posouzení požární bezpečnosti v tunelových stavbách jsou matematické modely požáru nevhodnější metodou. Modely požáru jsou dnes velmi přesné, i když CFD modely mají vysoké požadavky na přesnost vstupních dat do modelu, hardware a čas výpočtu, jsou stále ekonomicky méně náročnější než reálné velkorozměrové zkoušky požárů v tunelech, hlavně z pohledu možného porušení konstrukce vlivem vysokých teplot. Přístup založený na pokročilém modelování požáru umožňuje předpovídat různé aspekty požárních jevů, zejména v uzavřených prostorech, což nám umožňuje lépe pochopit reálné chování požáru. [3] Požár může být rovněž efektivně charakterizován a předpovídán prostřednictvím zjednodušených modelů v podobě teplotních křivek.

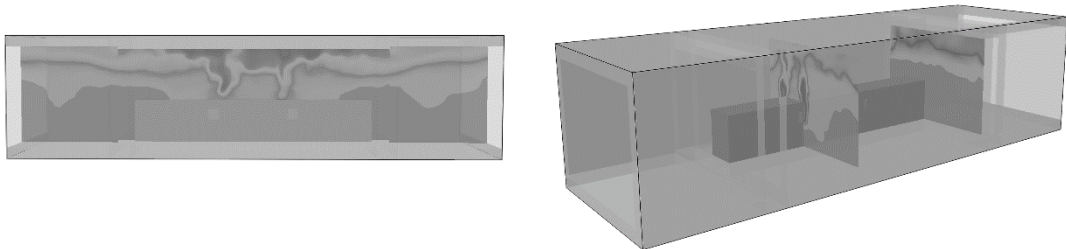
ŘEŠENÝ PŘÍKLAD

Cílem řešeného příkladu je analýza požární bezpečnosti v železničním tunelu Nová Dubeč. Tunel je navržen v délce 2 592 m. Tunel bude hloubený s dvěma kolejemi pro rychlost vlaků 200 až 320 km/h. Příčný řez tunelu je vidět na obrázku 1. Na vysokorychlostní trati, tzn. i ve všech tunelech, je uvažována pouze osobní doprava s vlaky kategorie B dle TSI 1302/2014. [4] Pro rozsáhlý mo-

del, v tomto případě několika kilometrový tunel, kde se předpokládá velmi časově náročný výpočet, je vhodné nejdříve vytvořit jednodušší model, na kterém lze ověřit správnost vstupů. Tento model menších rozměrů je vidět na obrázku 2. Pro vybraný tunel tento zjednodušený model obsahuje výsek části konstrukce, hrubší výpočetní síť, s řešením pro kratší výpočetní čas. Hlavním cílem zjednodušeného modelu je ověření správnosti zdroje požáru. Zjednodušený model simuluje délku tunelu 48 m. Na následujících obrázcích jsou výsledky řešeny pouze do času 500 s.



Obr. 1 Příčný řez tunelu Nová Dubec
Fig. 1 Cross section of tunnel Nová Dubec



Obr. 2 Zobrazení teploty plynu v zjednodušeném modelu tunelu Nová Dubec
Fig. 2 Gas temperature distribution in simplified model of tunnel Nová Dubec

ZÁVĚR

Pravděpodobnost vzniku požáru v železničních tunelech může být nízká, ale jeho následky mohou být závažné. Historicky se v tunelech vyskytly několikrát požáry, některé měly vážné následky. Velký požár může ohrozit stabilitu tunelové konstrukce, zejména pokud trvá příliš dlouho. Při požáru jsou v tunelu ohroženy také osoby. Neméně důležitým bodem bezpečného návrhu je proto správné řešení evakuace. Z výše popsaných důvodů je klíčové neustále zdokonalovat metody požární bezpečnosti a věnovat se výzkumu nových poznatků. K tomu je možné využít moderních metod jako jsou numerické simulace. Cílem budoucí diplomové práce je vytvořit přesný CFD model v programu Fire Dynamics Simulator [5]. V diplomové práci budou poznatky ze zjednodušeného modelu aplikovány na model celé délky tunelu.

LITERATURA

- [1] *Výroční zpráva SŽDC*. B.m.: Praha. 2022
- [2] STEČÍNSKÝ, Bohuslav. BEZPEČNOST DOPRAVY V ŽELEZNIČNÍCH TUNELECH SAFETY OF TRAFFIC IN RAILWAY TUNNELS.
- [3] HURLEY, Morgan J., Daniel GOTTUK, John R. HALL, Kazunori HARADA, Erica KULIGOWSKI, Milosh PUCHOVSKY, José TORERO, John M. WATTS a Christopher WIECZOREK, ed. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* [online]. New York, NY: Springer New York, 2016 [vid. 2023-04-18]. ISBN 978-1-4939-2564-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4939-2565-0
- [4] Nařízení Komise (EU č. 1303/2014) ze dne 18. 11. 2014 o *technické specifikaci pro interoperabilitu (TSI) týkající se „bezpečnosti v železničních tunelech“ železničního systému Evropské unie*. Ve znění pozdějších změn a oprav (Nařízení Komise EU č. 2016/912, Prováděcí Nařízení Komise EU č. 2019/776).
- [5] McGRATTAN, K. et al *Fire Dynamics simulator – User’s Guide*. NIST Special Publication 1019-6. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, November 2021.

MODELOVÁNÍ PUTUJÍCÍHO POŽÁRU A JEHO VLIV NA ODHOŘÍVÁNÍ DŘEVA MODELLING OF TRAVELLING FIRE AND ITS EFFECT ON BURNING OF TIMBER

Bc. Tomáš Beck

Abstract

This article outlines a relatively unexplored issue of the type of fire called "traveling fire. It deals with the literature review of the traveling fire issue and the numerical model of traveling fire in FDS software. Subsequently, using results of this model, the impact of traveling fire on a wooden structure will be addressed in the future master thesis.

Key words: Travelling fire; FDS; Wood crib; Pyrolysis; Large compartment fires

ÚVOD

V požární bezpečnosti staveb stále převládá navrhování budov pomocí preskriptivních metod. V České republice zejména normy řady ČSN 73 08xx a zákon č. 133/1985 Sb. o požární ochraně a jeho prováděcí předpisy. Tyto metody už z podstaty nemohou podchytit všechny typy objektů, nebo nové stavební materiály a stavební postupy, i v návaznosti na nynější trend udržitelné výstavby. To může vést k neefektivním návrhům. Proto je možné postupovat odlišně od preskriptivních metod, což povoluje § 99 zákona č. 133/1985 Sb. o požární ochraně při dosažení alespoň stejného výsledku.

V případě návrhu požární odolnosti konstrukcí se tradičně předpokládá s homogenními teplotními podmínkami v celém prostoru. V praxi to znamená zejména použití teplotních křivek, které udávají teplotu pro celý prostor. Jedná se zejména o nominální normovou teplotní křivku ISO 834 a modelovou parametrickou teplotní křivku doporučovanou v informativní příloze A ČSN EN 1991-1-2. Případně zpřesněné výpočetní modely, například zónové modely, které předpokládají horizontální rozdělení prostoru do dvou zón, ve kterých je však teplota také homogenně rozdělena. Nevýhoda výše uvedených modelů požáru také spočívá v jejich omezeném použití (velikost požárního úseku, požární zatížení atd.).

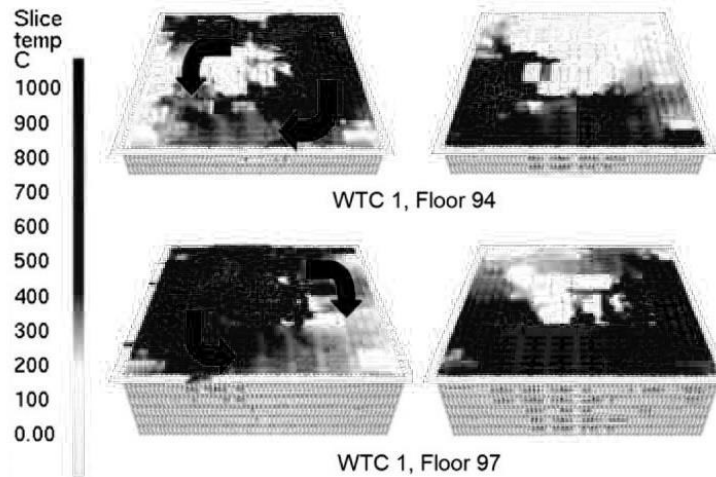
Z pozorování skutečných požárů a požárních zkoušek ve velkých požárně nedělených prostorech je zřejmé, že málokdy hoří všechny hořlavé materiály v prostoru současně. Obvykle hoří v danou chvíli pouze část prostoru a s časem požár putuje po prostoru. Vznikají tak oblasti s různými teplotami, což může mít zásadní vliv na chování konstrukce. Proto je důležité se tímto fenoménem zabývat, zjistit jeho vliv na konstrukce a do praxe přivést nový analytický model putujícího požáru.

Cílem seminární práce autora toho článku je zpracovat a validovat CFD model putujícího požáru, který bude v navazující diplomové práci použit pro zjištění vlivu putujícího požáru na odhořívání dřeva. CFD model se bude opírat o FDS model putujícího požáru z disertační práce [1], bude však upraven a zpřesněn dle současných možností simulačních technologií. Tento model bude validován pomocí požárního experimentu ve Veselí (2011) [2].

SKUTEČNÉ POŽÁRY A PUTUJÍCÍ POŽÁR

Putující požár ve velkoprostorové kanceláři byl pozorován 11. září 2001 při teroristickém útoku na World Trade Center. Požár vznikl po nárazu letadel. Toto chování požáru vyplývá i z numerické simulace [3] pomocí softwaru FDS, ze kterých je zřejmé, že se v rámci podlaží vyskytovaly velice rozdílné teploty plynů, což je patrné z Obr. 1.

Rozdílné teploty plynů v rámci požárního úseku byly pozorovány např. i při požáru First Interstate Bank Building v Los Angeles. Požár vypukl 4. května 1988, ve 12. podlaží, 62 podlažní budově banky. V budově se nacházelo asi 50 osob. Zraněno bylo 37 osob včetně 3 hasičů.

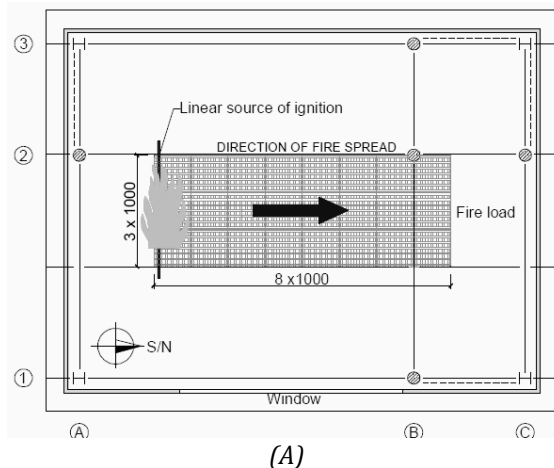


Obr. 1 Simulace putujícího požáru v 94. a 97. podlaží WTC1 [3]
 Fig. 1 Simulation of travelling fire on the Floor 94 and 97 [3]

POŽÁRNÍ EXPERIMENT VESELÍ 2011

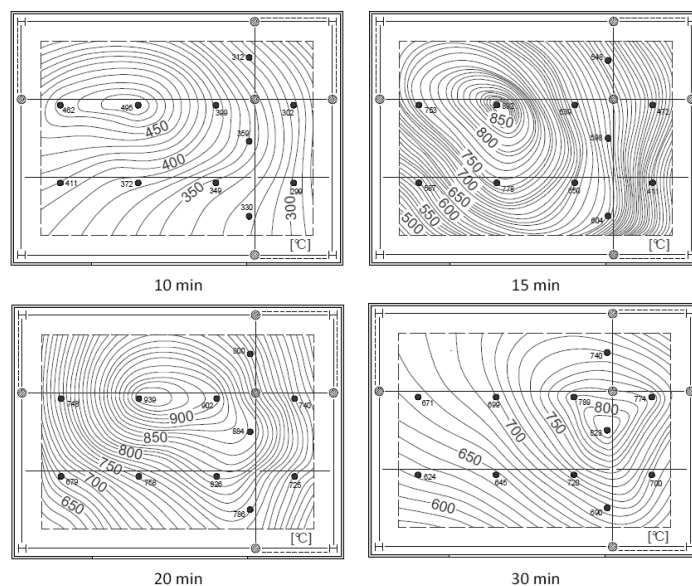
V roce 2011 provedl tým kolem prof. F. Walda dva požární experimenty ve Veselí nad Lužnicí [2]. Experimenty byly provedeny ve dvoupodlažním objektu viz Obr. 2, o půdorysných rozměrech 10,4 x 13,4 m a výšky 9 m. Objekt představoval část typické administrativní budovy. Svislými nosnými konstrukcemi byly sloupy z profilů HEB a ocelobetonové sloupy (trubkové profily vyplněné betonem). Vodorovnými nosnými konstrukcemi byly průvlaky a stropnice spřažené s železobetonovými deskami vybetonovanými do trapézových plechů.

Experiment ve 2.NP sloužil k ověření chování putujícího požáru. Požární zatížení bylo reprezentováno dřevěnými hranoly 50x50x1000 mm. Tyto hranoly byly poskládané do hranic po 42 ks. Hranic bylo celkem 24 (3x8), viz obr 2. (A), tedy 1008 kusů hranolů. Iniciačním zdrojem byl tenkostěnný U profil vyplněný minerální vatou napuštěnou parafínem. Požární zatížení odpovídalo $198,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$.



Obr. 2 (A) Schéma požárního zatížení ve 2.NP; (B) Foto experimentu ve 2.NP [1]
 Fig. 2 (A) Fire load scheme in the Floor 2; (B) Picture of the fire test in the Floor 2 [1]

Z Obr. 3, který pomocí izočar zobrazuje rozložení teploty v prostoru v čase z tohoto experimentu, je patrné, že chování požáru odpovídá putujícímu požáru.

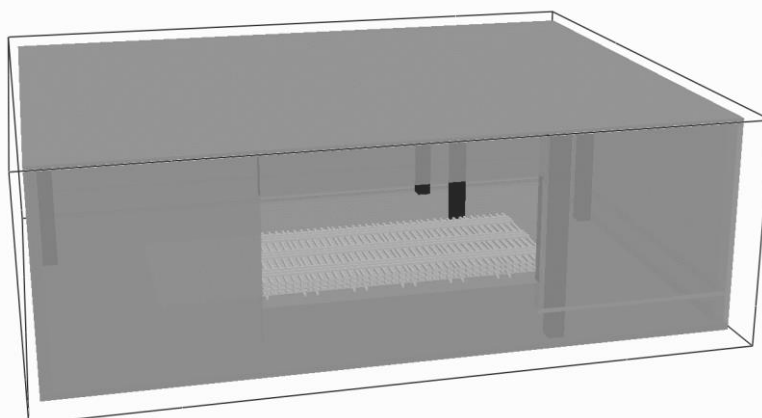


Obr. 3 Rozložení teploty [°C] plynů v prostoru v čase [1]
 Fig. 3 Gas temperature contours [°C] recorded during the fire test [1]

ŘEŠENÝ NUMERICKÝ MODEL PUTUJÍCÍHO POŽÁRU

Autor této práce vytvořil numerický model pomocí softwaru FDS v 6.8.0 (Fire Dynamics Simulator). FDS je program vyvinutý výzkumnou organizací NIST (National Institute of Standards and Technology) v USA. Software funguje na principu dynamického proudění tekutin, či častěji používaný anglický ekvivalent CFD (Computational Fluid Dynamics), kdy prostor je rozdělen do velkého, ale konečného počtu trojrozměrných kontrolních objemů (buněk), které vytvářejí prostorovou síť. V každé z buněk jsou počítány stavové rovnice, rovnice zachování energie, hmoty a chemických látek a rovnice zachování hybnosti. [4]

Jedná se o model požárního experimentu z Veselí n. L. z roku 2011. Konkrétněji o experiment ve 2.NP, kde byl připraven putující požár. Geometrie modelu (Obr. 4) je shodná s geometrií experimentu viz výše. CFD model tohoto experimentu byl již publikován v roce 2015 v disertační práci K. Horové [1]. Je zde však prostor pro zpřesnění tohoto modelu. Zejména co se týče modelování hoření dřevěné hranice. Vzhledem k času byla použita nedostatečná jemnost výpočetní sítě, což je patrné i z článku prof. Xu Dai [5].

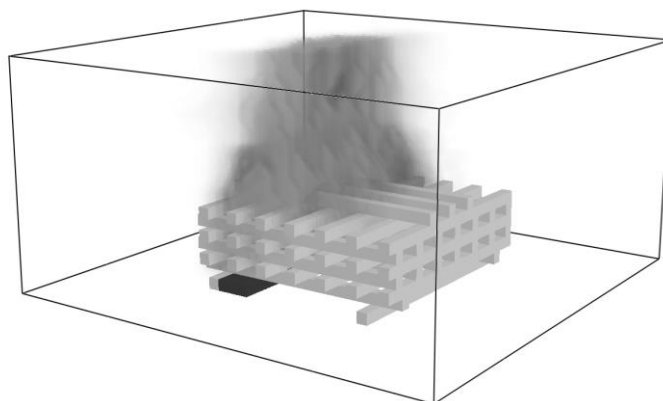


Obr. 4 CFD model experimentu Veselí 2011
 Fig. 4 CFD model of fire test Veselí 2011

MODELOVÁNÍ HOŘENÍ DŘEVA

V zásadě lze hoření dřeva modelovat v FDS dvěma způsoby. První způsob, který byl použit v disertační práci K. Horové [1] i v článku prof. Xu Dai [5], spočívá v tom, že se nadefinuje materiál „dřevo“, jeho efektivní výhřevnost a reakční teplo a zápalná teplota. Dřevo pak hoří dle zadané křivky HRR. Druhým způsobem je komplexní pyrolýza. Zásadní rozdíl oproti předchozímu modelu je definování reakce přeměny základního materiálu na hořlavý plyn + jinou pevnou látku (saze). Hoření tak není definované pomocí křivky HRR, ale je vypočítáváno v závislosti na objemu a teplotě uvolněných hořlavých plynů ze zadaného materiálu.

V diplomové práci autora tohoto článku bude provedena analýza hoření jedné hranice dřeva (Obr. 5) a porovnání obou způsobů modelování pyrolýzy pomocí křivek HRR.



Obr. 5 CFD model hranice dřeva
Fig. 5 CFD model of wood crib

ZÁVĚR

Problematika putujícího požáru je důležitá z pohledu vlivu na konstrukci. Putující požár a jeho vliv lze modelovat pomocí metody CFD. Za účelem použití putujícího požáru v praxi byly vyvinuty některé analytické modely, avšak pro lepší pochopení tohoto problému a následnou efektivní aplikaci do praxe je nutné putující požár nadále zkoumat. V budoucí diplomové práci bude použit validovaný CFD model putujícího požáru pro zjištění jeho vlivu na odhořívání dřevěné konstrukce.

LITERATURA

- [1] HOROVÁ, Kamila. Modelling of Fire Spread in Structural Fire Engineering. Praha, 2015. Disertační práce. České vysoké učení technické, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí. Vedoucí práce František Wald.
- [2] WALD, F., JÁNA, T., HOROVÁ, K. Design of joints to composite for improved fire robustness to demonstration fire test. Prague: CTU Publishing – Production, 2011
- [3] GANN, Richard G., Anthony HAMINS, Kevin MCGRATTAN, Harold E. NELSON, Thomas J. OHLEMILLER, Kuldeep R. PRASAD a William M. PITTS. Reconstruction of the Fires and Thermal Environment in World Trade Center Buildings 1, 2, and 7. Fire Technology [online]. 2013, 49(3), 679–707. ISSN 0015-2684, 1572-8099. Dostupné z: doi:10.1007/s10694-012-0288-3
- [4] WALD, F. a kol. Modelování dynamiky požáru při návrhu konstrukcí – Příručka k programu FDS. Praha: ČVUT v Praze – Fakulta stavební, 2015. ISBN 978-80-01-05633-2.
- [5] DAI, Xu, Antonio GAMBÀ, Chang LIU, Johan ANDERSON, Marion CHARLIER, David RUSH a Stephen WELCH. An engineering CFD model for fire spread on wood cribs for travelling fires. Advances in Engineering Software [online]. 2022, 173, 103213. ISSN 09659978. Dostupné z: doi:10.1016/j.advengsoft.2022.103213

ČÁSTEČNĚ POŽÁRNĚ CHRÁNĚNÝ OCELOVÝ NOSNÍK PARTIALLY FIRE PROTECTED STEEL BEAM

Bc. Sára Vitnerová

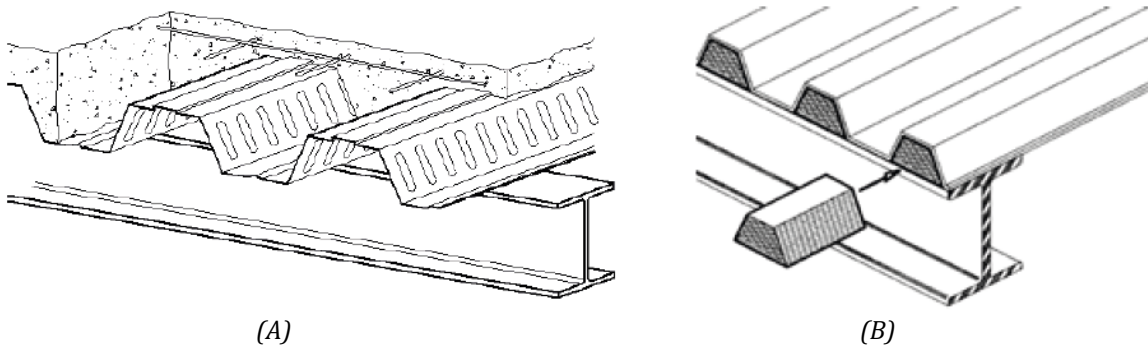
Abstract

The paper focuses on the heating of steel beam under trapezoidal sheets during fire. Fire protected and unprotected beams under trapezoidal sheets filled with concrete or thermal insulation are only partially exposed to the fire. The areas under the sheets are shaded by the roof and protected from direct radiation. The work consists of a literature review and preparation of experiments and preparation of a numerical solution by finite element method using Ansys software.

Key words: steel structure; steel beam; trapezoidal sheet; partial fire protection, fire design

ÚVOD

Spřažené ocelobetonové nosníky s trapézovými plechy se využívají jako stropní konstrukce. Ocelové trapézové plechy jsou zakryté nebo vyplněné tepelnou izolací. Pod trapézovým plechem se nad horní pásnicí nosníku vytvoří vzduchové dutiny, díky kterým se nosník při požáru nerovnoměrně ohřívá. Aby nosník tvořící strop byl chráněn proti ohni, musí být opatřen požární ochranou a ta musí pokrývat všechny povrchy vystavené požáru. V praxi je téměř nemožné aplikovat požární ochranu typu požárních nátěrů nebo nástřiků do dutin, proto se volí ekvivalentní opatření, a to vyplnění dutin. Pro vyplnění dutin se používají například speciální betonové bloky Obr. 1B nebo výplně z minerální vlny. Tato technologie je nákladná a není šetrná k životnímu prostředí.



Obr. 1 (A) Nevyplněné dutiny mezi trapézovým plechem a ocelovým nosníkem;
(B) Vyplněné dutiny speciálními bloky
Fig. 1 (A) Unfilled voids between the trapezoidal sheet and the steel beam;
(B) Cavities filled with special blocks

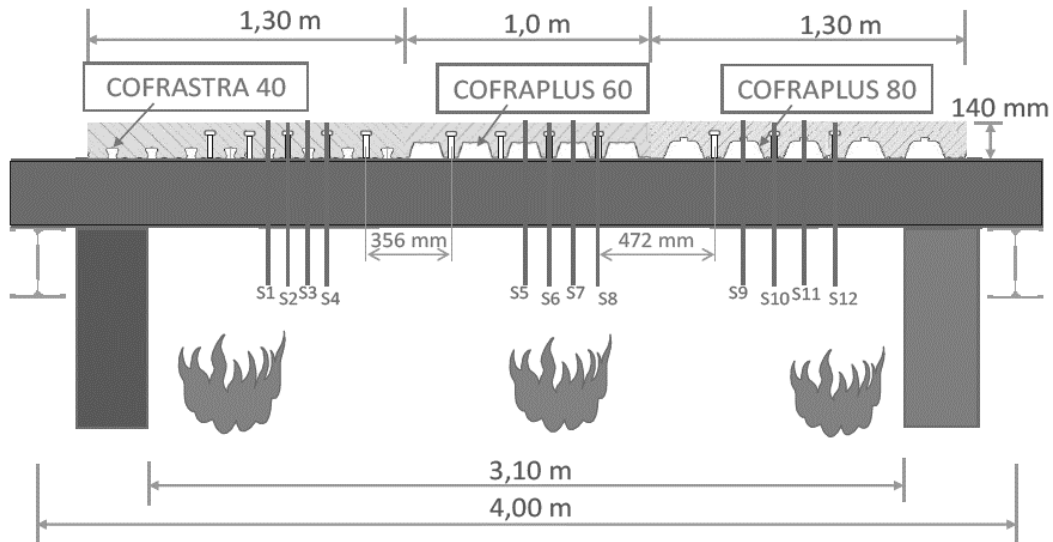
Dutiny vytvořené mezi nosníky tvoří prostor, kde je výrazně sníženo proudění horkých plynů a je chráněn před přímým sáláním. Tepelné působení horní pásnice je nižší než na ostatních plochách profilu vystaveném ohni.

SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

V inženýrské praxi se vliv vzduchových mezer pod vlnami zanedbává. Uvažuje se, že beton nepřispívá k zvyšování teploty a naopak se těží z odvádění tepla betonem.

V práci [1] je připraven numerický model skutečné konstrukce. Bylo zjištěno, že požární odolnost ocelových nosníků lze zajistit i bez zvláštních úprav dutin. Pracovníci CTICM připravili projekt, který na experimentu s ocelobetonovým nosníkem ověřili numerický model a navrhli zjednodušenou analytickou předpověď. [2] Dvě zkoušky na vodorovné peci připravily data pro numerický model. Následovala parametrická studie a vývoj zjednodušeného analytického modelu.

Zkoušelo se se zkušebními vzorky ocelových nosníků HE300B a IPE300. Byly použity tři druhy trapézových plechů (Cofrastra40, Cofrastra60, Cofrastra80). Při experimentu se měnila geometrií trapézového plechu hloubka vzduchových mezer pod vlnami plechu. Ocelové nosníky byly opatřeny požární ochranou z minerálních vláken. Konstrukce byla zkoušena na požární odolnost 60 minut a 120 minut. Prvky byly ohřívány plynem podle nominální normové křivky na teplotu dolní pásnice 500 – 600 °C. Rozmístění prvků při požární zkoušce je znázorněno na Obr. 2.



Obr. 2 Uspořádání zkoušky – boční pohled na nosníky

Fig. 2 Test set-up – side view of the beams

Výsledky experimentu doložily, jak se teplota nosníku zvyšuje s velikostí vzduchové mezery pod plechy. Teplota plynu v dutinách byla nižší u profilu HE300B než u profilu IPE300. Potvrdil se předpoklad, že dochází k nižšímu proudění horkého plynu v dutinách kvůli omezenému prostoru, a teplota horní pásnice byla nižší než na ostatních plochách nosníku.

Numerický model byl připraven v programu Ansys, který je modelem konečných prvků. Okrajové podmínky výpočtu a tepelné vlastnosti materiálů byly převzaty z evropské normy [3]. Byly vytvořeny dva modely v rovinném a prostorovém zobrazení. Výsledky řešení byly porovnány s experimentálními daty. Účelem rovinného numerického modelu bylo ověření tepelných charakteristik ochranného materiálu. Z výsledku vyplývá velmi dobrá korelace mezi numerickými výsledky a experimentálním měřením. Zlepšení přesnosti numerického modelu bylo dosaženo pomocí prostorového modelu. Pro znázornění vývoje teploty horkých plynů v dutině byl navržen zjednodušený přístup, kde vyjádření teplotní křivky horkých plynů je následující:

$$\theta_{g,cav} = 20 + \min(300; 175 + 400\beta_{dim,cav}) * t^{0,24} = 20 + c_{eff} * t^{0,24} \quad (1)$$

kde

$\theta_{g,cav}$ je teplota horkého plynu v dutinách vytvořených mezi ocelovým nosníkem a ocelovým plechem [°C]

t je čas [min]

$\beta_{dim,cav} = \frac{2hl}{(B + 2e_p)^2}$ je parametr zohledňující dutiny

Návrhový zjednodušený přístup byl ověřen na experimentu, kde ocelové nosníky byly bez požární ochrany.

V návrhu zjednodušeného analytického řešení byl zohledněn vliv vzduchových dutin pro vyhodnocení ohřevu horní pásnice ocelového nosníku. Vzalo se v úvahu snížení vystavení tepelným

účinkům, proto byl upraven součinitel zastínění k_{sh} , součinitel průřezu A_m/V a emisivita. Pro analytický model byla použita upravená teplotní křivka plynů, rovnice (1). U součinitele průřezu byla zohledněna tloušťka horní pásnice viz vztah (3). Emisivita byla upravena z hodnoty 0,7 na hodnotu 0,49. Jedná se o hodnotu součinitele emisivity dvou ploch, protože nezakrytá horní strana profilu v dutině přijímá záření povrchu trapézového plechu. Výraz pro výpočet nárůstu teploty $\Delta\theta_{a,t}$ v ocelovém prvku za časový interval (Δt) lze popsat vztahem (2).

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad (2)$$

kde

$$k_{sh} = 1,0$$

$$A_m/V = \frac{l}{(l_1 + l_2 + l_3)t_f} t \quad (3)$$

$$\varepsilon_m = 0,49$$

Zjednodušený analytický model je na straně bezpečí. Nadhodnocuje teplotu horní pásnice až o 40 %.

PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

Bude se studovat částečně požárně chráněný ocelový nosník pod trapézovými plechy ve střešní konstrukci. Stropní konstrukce byla řešena výše. Nad trapézovými plechy nebude beton, ale minerální izolace představující skladbu střešního pláště. Cílem je studie vlivu vrstev nad trapézovým plechem.

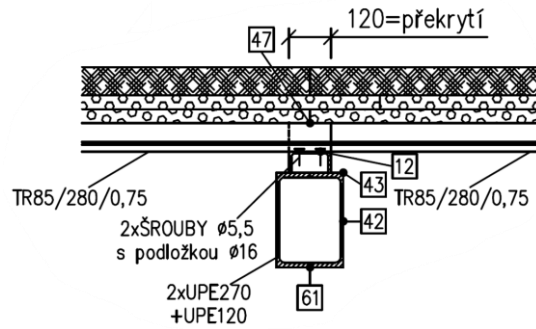
Numerický model bude nejprve validován na experimentu CTICM viz výše. V peci miniFUR bude připraven vlastní experiment v požární laboratoři UCEEB ČVUT v Buštěhradě. Zkušební pec je určena pro středněrozměrové indikativní zkoušky požární odolnosti stavebních konstrukcí. Tvoří ji snadno demontovatelný mobilní box o vnitřních rozměrech $1,2 \times 0,8$ m a výšce 0,8 m. Je větrán otvory v bočních stěnách umožňujícími přirozený přívod vzduchu pro spalování a odvodu tepla a kouře. Účinek požáru zajišťuje plynový hořák s narůstajícím tepelným výkonem, který je schopen docílit tzv. normového požáru, tedy průběhu teplot dle normové teplotní křivky (ISO 834). Pro zkoušku budou použity následující zkušební vzorky: ocelový nosník – IPE100, trapézový plech – T20, minerální vlna – 60 mm.

Před experimentem bude nejdříve připraveno numerické řešení v programu Ansys a po zkoušce se bude model validovat.

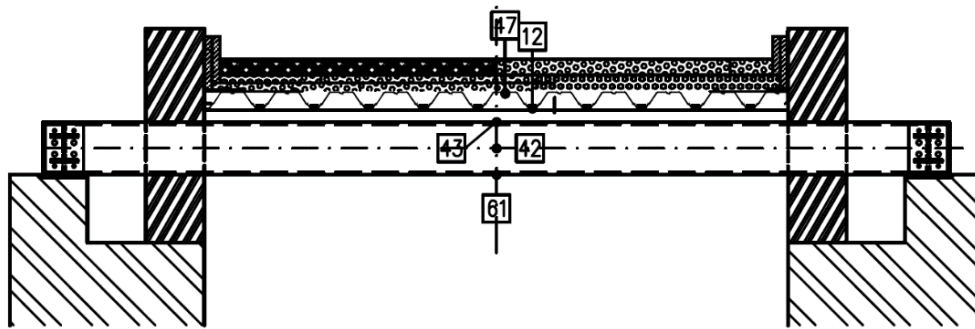
V přípravě je i sada experimentů na vodorovné peci v rámci rozborového úkolu České agentury pro standardizaci Požární odolnost lehkých střešních pláštů. Čtyři zkoušky požární odolnosti lehkých střešních pláštů na trapézovém plechu v požární zkušebně PAVUS ve Veselí nad Lužnicí umožní měřit i teplotu nosníků.

První požární zkouška proběhne v červnu 2024 a řeší 2x prostý nosník s překrytím plechů 120 mm na prostřední podpoře Obr. 3 a Obr. 4. Plech, podpory i spojovací prostředky jsou vystaveny požáru. Je použit trapézový plech 85/280 tloušťky 0,75 mm. Je zkoušena celovatová skladba s nehořlavým tepelným izolantem z minerálních vláken a také kombinovaná skladba s izolantem z minerálních vláken v kombinaci s hořlavým tepelným izolantem z EPS. V každé vlně budou použity dva samovrtné šrouby $d=5,5$ mm s podložkou. Zatížení bude částečně vnášeno závěsy. Bude se měřit vodorovná reakce v podporách, prokluz kotvení plechu, průhyb uprostřed rozpětí obou polí. Dále se bude měřit teplota: ve zkušební komoře; plechu (uprostřed rozpětí a blízko šroubů); na rozhraní jednotlivých vrstev střešního pláště; na neohříváném povrchu vzorku; v podporách.

Výstupy z rozborového úkolu budou použity pro tvorbu postupu rozšířené aplikace výsledků požárních zkoušek pro posouzení požární odolnosti lehkého střešního pláště s nosným trapézovým plechem.



Obr. 3 Řez nosníkem
Fig. 3 Beam section



Obr. 4 Uspořádání zkoušky – boční pohled na nosníky
Fig. 4 Test set-up – side view of the beams

ZÁVĚR

Článek shrnul problematiku částečně požárně chráněných nosníků pod trapézovými plechy. Seznámil s experimentálními, numerickými a analytickými modely, které se na problematiku zaměřily. Získané poznatky budou použity k experimentálnímu, numerickému i analytickému modelu v připravované diplomové práci. Cílem bude zjistit chování střešní konstrukce, která se bude lišit od stropní tím, že namísto betonové vrstvy bude použita dutina nebo vrstva tepelné izolace, která bude představovat reálnou skladbu střešního pláště.

PODĚKOVÁNÍ

Práce vznikla s podporou rozborového úkolu České agentury pro standardizaci Požární odolnost lehkých střešních pláštů.

LITERATURA

- [1] BIHINA, Gisèle, Christophe RENAUD a Bin ZHAO. *Résistance au feu des poutres en acier protégés sans traitement des vides des nervures du bac acier au-dessus des profilés métalliques*. B.m.: Revue construction métallique. 2022
- [2] VU, Hoang a Bin ZHAO. *Influence of non-fulfillment of the cavities in the steel deck ribs above the steel profiles on the temperature champs of protected beams*. B.m.: Revue construction métallique. 2024
- [3] *NF EN 1991-1-2: Eurocode 1 - Actions on structures - Part 1-2 General actions - Actions on structures exposed to fire*. B.m.: AFNOR. 2003

RYCHLOSTI ZUHELNATĚNÍ DŘEVA SE ZOHLEDNĚNÍM VLIVU VÝVOJE TRHLIN: NUMERICKÉ ŘEŠENÍ S VYUŽITÍM PRAVDĚPODOBNOSTNÍCH POSTUPŮ

CHARRING RATES OF WOOD CONSIDERING THE EFFECT OF CRACK DEVELOPMENT: NUMERICAL SOLUTION USING PROBABILISTIC PROCEDURES

Bc. Simona Rušarová

Abstract

The use of wood in the construction industry is increasing due to its sustainable and ecological properties. However, in order to ensure adequate fire resistance of timber structures, it is essential to thoroughly investigate their behaviour during a fire. A key factor is to determine the depth of the charred layer. This paper compares simplified and advanced methods of calculating charring rate and depth. Simplified methods, such as standard calculations, assume a constant charring rate and do not consider the variable properties of the wood. In contrast, advanced methods, including numerical models and probabilistic approaches, allow for variable factors such as wood density, oxygen concentration and cracks. The results show that probabilistic approaches that incorporate nonlinearities provide more accurate estimates of charring depth and are essential for optimizing the fire resistance of wood structures in natural fires.

Key words: charring rate; crack; charred layer; wood; probability

ÚVOD

V posledních letech roste poptávka pro využívání dřeva ve stavebnictví, jelikož dřevo je udržitelný, obnovitelný a přírodní materiál, který je šetrný k životnímu prostředí. Na tomto základě je důležité zkoumat chování dřevěných konstrukcí za požáru s využitím srovnání normových postupů s pokročilými. Současným výzkumem, kdy je kladen důraz na vliv vlhkosti, objemové hustoty, trhlin ve dřevě nebo tepelným rozkladem, lze popsat reálnější chování dřeva, a tím i přesněji popsat požární odolnost dřevěné konstrukce [1]. Hlavní otázkou je stanovení vývoje zuhelnatělé vrstvy při požáru, jelikož její průběh není konstantní a liší se s každým požárem [1]. Vývoj zuhelnatělé vrstvy přímo ovlivňuje požární odolnost dřevěného prvku. Pro stanovení zuhelnatělé vrstvy je nutné znát mnoho materiálových charakteristik. Je možné využít mnoho výpočetních postupů od zjednodušených s lineárním průběhem po nelineární, nebo pokročilý postup využívající pravděpodobnost. Rychlost tvorby zuhelnatělé vrstvy se liší s časem a druhem dřeva, není tedy konstantní po celou dobu hoření dřeva [2], tuto skutečnost mnoho metod neuvažuje. Pro navrhování se nejčastěji používá normový výpočet, který rychlost zuhelnatění zohledňuje pomocí konzervativních hodnot, a je platný při vystavení prvku normovému požáru, kdežto skutečný prvek podléhá namáhání přirozeným požárem, lokálním požárem, nebo plně rozvinutým, kdy může být dosaženo mnohem vyšších teplot než při normovém požáru. Pravděpodobnostní přístup je považován za nezbytný pro zpřesnění výpočtu [3] zuhelnatělé vrstvy, zejména pro podmínky přirozeného požáru [1].

Zuhelnatělá vrstva plní funkci tepelné bariéry. Pokud se v prvku vyskytne trhlina, bariéra je narušena, a probíhá v místě zrychlení hoření a prostupu tepla do prvku. Toto má výrazný vliv na rozměry účinného průřezu. Zároveň trhliny umožňují únik těkavých látek, které ve spojení s okolním kyslíkem přispívají ke spalování. Je tedy zřejmé že trhliny je třeba do výpočtů zavádět a uvažovat. Zvýšená přesnost výpočtu hloubky a rychlosti zuhelnatění je rozhodující pro optimalizaci požární odolnosti dřevěných konstrukcí při přirozeném požáru [1].

MOŽNOSTI STANOVENÍ HLOUBKY A RYCHLOSTI ZUHELNATĚNÍ

V normě ČSN EN 1995-1-2 je definována zuhelnatělá vrstva jako vzdálenost mezi vnějším povrchem původního prvku a polohou čáry zuhelnatění [2]. Zuhelnatělou vrstvu lze vypočítat z doby vystavení účinkům požáru a příslušné rychlosti zuhelnatění pro uvažované dřevo, poloha čáry

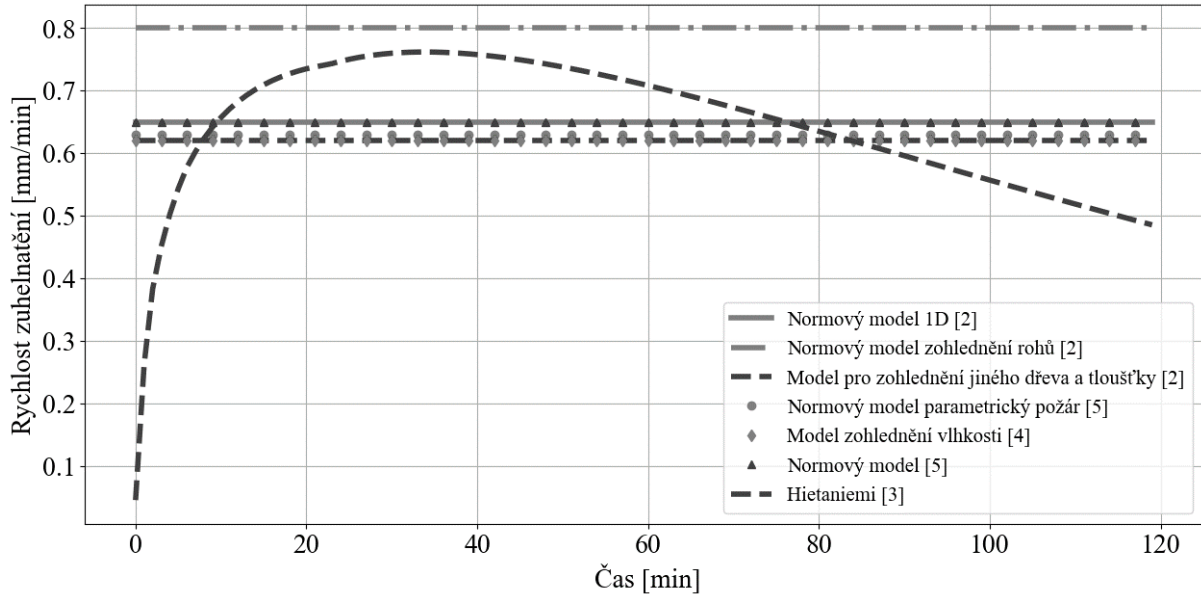
zuhelnatění se má uvažovat jako poloha izotermy 300 °C [2]. Tento postup uvádí dvě rychlosti zuhelnatění pro výpočet 1D vedení tepla (desky), nebo pro případ, kdy je potřeba zohlednit vliv zaoblení rohů (trámy). Rychlost zuhelnatění je pro oba případy konstantní, předpokládá se vystavení normovému požáru a nelze zde zohlednit reálné vlastnosti dřeva, postup je omezen na druh dřeva s danou hustotou a tloušťku prvku. Je možnost úpravy vzorce, kde se zohlední druhu dřeva a jiná tloušťka prvku, platí pro deskové prvky. Lze také postupovat dle přílohy A, kde je navržen výpočet pomocí parametrických křivek, kde lze zohlednit další parametry požáru. Pro zohlednění vlhkosti Paulo Cachim a Jean-Marc Franssen [4] upravili rovnici pro rychlost zuhelnatění, kde je možné zohlednit vlhkost i hustotu dřeva, tento postup umožnil stanovit rychlosti zuhelnatění pro dřevo s jinou vlhkostí, než je 12 % [2]. V TNI prEN 1995-1-2 [5] se do výpočtu zahrnuje konstanta k , která zohledňuje různé faktory, jako je vliv trhlin, spojů, tloušťka prvků a jiné. V tomto postupu je rychlost zuhelnatění opět konstantní a uvažuje se normové působení požáru.

Hietaniemi [3] popsal pokročilý pravděpodobnostní přístup k výpočtu rychlosti zuhelnatění dřeva. Tento postup umožňuje zahrnout proměnlivé faktory, jako je tepelný tok, koncentrace kyslíku, hustota a vlhkost v čase za různých teplotních podmínek. K modelování těchto veličin využívá pravděpodobnostní rozdělení [3]. Hietaniemiho metoda výpočtu přesahuje omezení standardního postupu, takže je použitelná pro širokou škálu požárních scénářů.

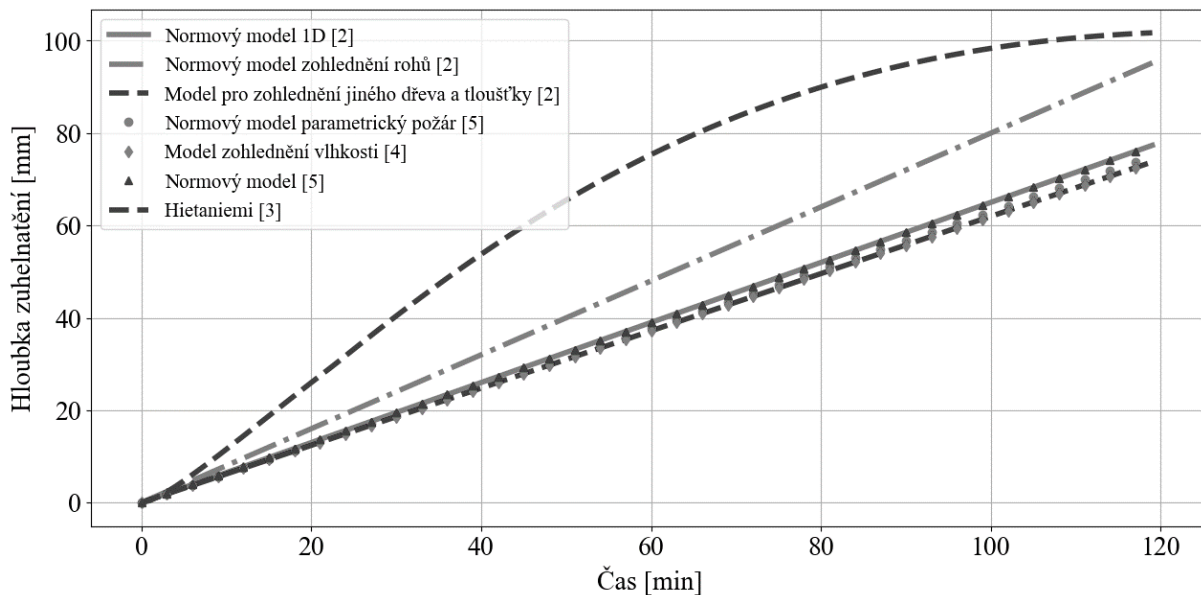
V mnoha postupech a metodikách je vliv trhlin zcela či částečně zanedbán, nebo je k nim přistoupeno konzervativně. Trhliny se ve dřevě vyskytují přirozeně vlivem růstu, při těžbě a manipulaci anebo vlivem zvýšené teploty. Při teplotě kolem 100 °C se ze dřeva začíná odpařovat vlhkost. Když teplota dosáhne přibližně 300 °C, vytvoří se zuhelnatělá vrstva, která nemá prakticky žádnou pevnost, což vede k praskání a vytváření trhlin [6]. Kritický tepelný tok pro vznik trhlin je 15kW/m², trhliny se tvoří najednou a pak se dále jen rozšiřují [6]. Trhliny ve zuhelnatělé vrstvě vzniklé na povrchu mají menší objem, než je objem původního dřeva. Počet trhlin se zvětšuje s rostoucím tepelným tokem, a naopak počet trhlin se snižuje s rostoucím okolním tlakem [6]. Byl proveden výzkum [6], kde byl využit pravděpodobnostní přístup pro předpověď vývoje trhlin ve zuhelnatělé vrstvě, který potvrdil vývoj trhlin u desek do tloušťky 19 mm, vystavené požáru 12,5 minut. Pokud by byla možná předvídat vznik trhlin a zahrnout tuto předpověď do statických výpočtů by bylo možné navrhovat dřevěné konstrukce efektivněji a hospodárněji [6].

Potřeba pokročilých modelů, které zohlední náhodnosti parametrů, je zřejmá i přes jejich složitost [1]. Studie Huč a dalších [7] se zabývaly stochastickými analýzami hoření dřeva, přičemž zohledňovaly proměnné, jako jsou tepelné vlastnosti a tepelný tok, ale spoléhaly na zjednodušené modely pro stanovení zuhelnatělé vrstvy. Byl vytvořen model PyCiF [8], který kombinuje model pyrolýzy dřeva s druhým submodelem tzv. heat-mass model, který vychází ze zákona zachování energie a zákona zachování hmoty [1], [8]. Pomocí modelu PyCiF je možné stanovit hloubku zuhelnatění, aniž by musela být určena poloha izotermy 300 °C. Model ukazuje významnost vlivu parametrů na výslednou hloubku zuhelnatění.

Z grafu lze vyčíst, že pokud jsou do výpočtu zahrnuty nelinearity a je použit pravděpodobnostní přístup, je získána zcela odlišná rychlost zuhelnatění. Všechny rychlosti zuhelnatění, kromě statistického přístupu dle Hietaniemiho [3], jsou konstantní a pohybují se na podobné hodnotě. Vyšší hodnota 0,8 mm/min pro normový požár je dána tím, že je uvažováno, že prvek odhořívá rychleji, jelikož se nejedná o 1D vedení tepla. Pouze v pravděpodobnostním přístupu, při zohlednění proměnných vlastností dřeva v čase za zvýšené teploty, je možné dosáhnout podobného průběhu rychlosti zuhelnatění jako je reálný průběh. V tomto případě zuhelnatělá vrstva po vytvoření tvoří tepelnou bariéru, a dřevo tedy odhořívá pomaleji a rychlost klesá. Stejně tak je známo, že dřevo s vyšší hustotou odhořívá pomaleji [2], což však ve zjednodušených postupech není zohledněno (viz Obrázek 1). Tvorba zuhelnatělé vrstvy pak dle výše popsaných postupů je uvedena na Obrázku 2.



Obr. 1 - Rychlosti zuhelnatění pro různé postupy
Fig. 1 - Charring rates for different approaches



Obr. 2 - Hloubka zuhelnatění pro různé postupy
Fig. 2 - Depth of the charred layer for different approaches

Z grafů je vidět, že pro zjednodušené postupy je tvorba hloubky zuhelnatění konstantní a s časem vzrůstá. Postup dle Hietaniemiho [3] popisuje vliv teplotní bariéry tvořené zuhelnatělou vrstvou a může lépe popsat reálné chování dřeva při požáru. Lze tedy z obou grafů vyčíst, že zjednodušené postupy jsou výrazně na straně bezpečné, ale nemusí přesně odpovídat reálnému chování dřeva při požáru. Jelikož se jedná o postupy, které se opírají o normový požár, nelze do výpočtu zahrnout znovu rozhoření dřeva od žhnutí, změnu procenta kyslíku ve vzduchu ani proměnnou vlhkost dřeva, která by měla vliv na tvorbu a rychlost zuhelnatělé vrstvy.

ZÁVĚR

Cílem tohoto článku bylo porovnání zjednodušených postupů s pravděpodobnostním přístupem a poukázání na fakt, že zjednodušené postupy nejsou schopny zahrnout nelinearity do výpočtu a možné zanesení vlivu trhlin do jejich řešení může být nevhodné. Zjednodušené empirické výpočty

hloubky zuhelnatění navzdory své jednoduchosti z hlediska výpočtu zahrnují pouze základní charakteristiky požáru a nabízejí rychlou a obecně bezpečnou metodu, ovšem neodpovídají reálnému chování dřeva. Pokročilé metody založené na fyzikálních principech, či s využitím pravděpodobnosti, jsou nezbytné pro přesné modelování přírodních požárů.

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS22/144/OHK1/3T/11 Bezpečnost a udržitelnost dřevěných a ocelových konstrukcí při požáru.

LITERATURA

- [1] ŠEJNA, Jakub, Dominik ŠTRAUS, Kamila CÁBOVÁ a František WALD. Probabilistic modelling of wood charring rates: A parametric study and next steps. *SiF 2024 – The 13th International Conference on Structures in Fire University of Coimbra* [online]. 2024, 13(In press), 11 [cit. 2024-05-19].
- [2] ŠEJNA, Jakub a Lukáš BLESÁK. *Požární odolnost dřevěných konstrukcí*. 1. Praha: Česká technika - Nakladatelství ČVUT, 2022. ISBN 978-80-01-07012-3.
- [3] HIETANIEMI, Jukka. *A Probabilistic Approach to Wood Charring Rate*. VTT Building and Transport. Julkaisija: Utgivare publisher, 2005. ISBN 951-38-6583-5. ISSN 1459-7683.
- [4] CACHIM, Paulo B. a Jean-Marc FRANSEN. Comparison between the charring rate model and the conductive model of Eurocode 5. *Fire & Materials* [online]. 2009, (33), 13 [cit. 2024-04-17]. Dostupné z: doi:doi:10.1002/fam.985
- [5] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. *TNI prEN 1995-1-2 E Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 1-2: Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. 2023.
- [6] ŠEJNA, Jakub, Kamila CÁBOVÁ, Kristýna PRŮŠOVÁ a František WALD. Cracks in the charred layer of timber slabs: fire experiments and probabilistic solution. *SSRN* [online]. 2024(1), 24 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: doi:https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4780326
- [7] HUČ, Sabina, Robert PEČENKO a Tomáš HOZJAN. Predicting the thickness of zero-strength layer in timber beam exposed to parametric fires. *Elsevier* [online]. 2021, 2021(229), 12 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2020.111608
- [8] PEČENKO, Robert, Tomáš HOZJAN a Sabina HUČ. Modelling charring of timber exposed to natural fire. *Journal of Wood Science* [online]. 2023, 2023(19), 14 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: doi:10.1186/s10086-023-02091-4

KŘÍŽEM VRSTVENÉ DŘEVO ZA POŽÁRU CROSS LAMINATED TIMBER UNDER FIRE

Bc. Andrea Smetanová

Abstract

The seminar paper deals with a literary review regarding cross-laminated timber. It assesses fire resistance and compares the standards ČSN EN 1995-1-2 and the pre-standard TNI prEN 1995-1-2. The main reason for the different layers charring at different rates could be the choice of adhesives used. The performance of adhesives depends on their chemical composition, with polyurethane adhesives being most commonly used. Manufacturers of CLT panels provide their technical procedures due to the concurrently issued but legally non-binding standards. The current standard does not provide any solution for CLT panels. Users tend to propose conservatively, using tabulated values for solid wood or glued laminated timber and applying them to the design of cross-laminated timber. However, this approach is imprecise; in the new pre-standard, CLT panels have a more detailed representation regarding the design process.

Key words: cross laminated timber; fire; CLT panel; charring rate; adhesives

ÚVOD

V této době křížem vrstvené dřevo neboli CLT panely představují moderní a rychlejší výstavbu v oblasti stavitelství z dřevěných konstrukcí. V České republice se tato možnost výstavby neustále zvyšuje z hlediska už zmíněné rychlosti výstavby, udržitelné výstavby a ekonomiky. Z hlediska požární odolnosti jsou dřevostavby stavěné z CLT panelů odolnější proti požáru a destrukcím lépe než ocelové konstrukce a dokáží konkurovat i betonovým konstrukcím.

V poslední řadě se zvyšuje i tlak na použití dřevěných materiálů na výstavbu, který k nám jde ze zahraničí, a to u oboru požární bezpečnosti staveb. V České republice lze stavět dřevostavby pouze s požární výškou do 12 m, což odpovídá 5 nadzemním podlažím při konstrukční výšce 3 m. Požární výška se určuje od podlahy prvního nadzemního podlaží až k podlaze posledního užitného nadzemního podlaží, popřípadě podzemního podlaží požárního úseku.

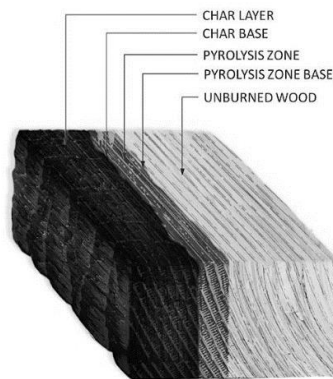
Porozuměním faktorů ovlivňující rychlost odhořívání jednotlivých vrstev křížem vrstveného dřeva může mít pozitivní dopad na inovaci z hlediska výpočtů, ale i požárního hlediska na zvolený materiál. Na rozdíl od rostlého dřeva nebo lepeného lamelového dřeva, které jsou v této oblasti více detailněji probrané. V prosinci roku 2023 vyšla přednorma TNI prEN 1995-1-2, která se detailněji zaměřuje i na navrhování na účinky požáru pro křížem vrstvené dřevo. Dosud byla od roku 2006 zavedena norma ČSN EN 1995-1-2, která křížem vrstvené dřevo neboli CLT, řešila pouze s parametry pro rostlé dřevo z jehličnatých dřevin a buku. Tyto tři druhy dřevěných materiálů mají ale jiné vlastnosti, proto výpočty byly naddimenzované na stranu bezpečnou ve výsledku pro CLT. Nejednalo se o reálné chování křížem vrstveného dřeva za požáru, což mění nová přednorma. Například i z důvodu, že rostlé dřevo může vykazovat vady jako jsou suky, což u křížem vrstveného dřeva se nestane. Lepené lamelové dřevo je taky z hlediska technologie jiné než křížem vrstvené dřevo.

DEGRADACE DŘEVA

Termická degradace dřeva lze rozdělit do třech stupňů. První stupeň degradace lze pozorovat při teplotách od +150 °C. Během tohoto stupně dřevo mění výrazně svou barvu na hnědou a začínou se projevovat snížené mechanické vlastnosti hlavně pevnost. Druhý stupeň se projevuje od teplot nad +220 °C a vede k tvorbě plynných produktů jakou jsou: vodík, methan, oxid uhelnatý a mnoho dalších produktů. Vytváří se vrstva pyrolýzy, která rovněž snižuje mechanické vlastnosti dřeva, respektive její pevnost. Poslední stupeň nastává od teplot +350 °C, kde se vytváří dřevěné uhlí, které za přítomnosti vzdušného kyslíku samovolně bezplamenně hoří [1].

HLOUBKA ZUHELNATĚNÍ

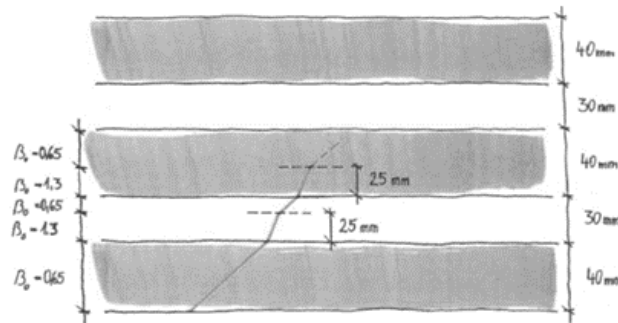
Hloubka zuhelnatění je termín používaný k popisu do jaké míry proniká uhlíková vrstva do porchu dřeva v důsledku vysokých teplot během požáru. Jedná se o vzdálenost mezi vnějším povrchem původního průřezu a polohou čáry zuhelnatění. Čára zuhelnatění je hraniční čára mezi vrstvou zuhelnatění a zbytkovým průřezem jak nám zobrazuje *Obr. 1 a Fig. 1*. Počítá se z doby vystavení účinkům požáru a příslušné rychlosti zuhelnatění. Poloha čáry se má uvažovat jako poloha izotermy 300° [2]. Tento proces slouží jako součást ochrany dřeva před dalším pronikáním ohně dovnitř do průřezu. Čím hlouběji uhlíková vrstva pronikne, tím větší ochrana je na povrchu dřeva poskytnuta. Hloubka zuhelnatění může být také dalším faktorem při posuzování úrovně poškození dřevěných konstrukcí za požáru a při vyšetřování příčin vzniklého požáru. Následně kurčení oprav nebo i k nahrazení konstrukcí v devastujících a nenahraditelných případech. Základní hodnoty pro hloubku zuhelnatění jsou pro jednorozměrné zuhelnatění návrhová hloubka $d_{char,0}$ závisující na jednorozměrné rychlosti zuhelnatění β_0 a nominální návrhové hloubce zuhelnatění $d_{char,n}$, která závisí na nominální rychlosti zuhelnatění β_n [2].



Obr. 1 Jednotlivé vrstvy dřeva při zvýšených teplotách [3]
Fig. 1 Individual layers of wood with increased options [3]

RYCHLOST ZUHELNATĚNÍ

Při provedených experimentálních zkouškách se vyvozují dva závěry. Ten první zní, že pokud jednotlivé vrstvy u CLT panelů neodpadnou vlivem odhořívání, je vytvořena vrstva zuhelnatění, která chrání zbytkový průřez proti ohni. „V tomto případě CLT panel vykazuje stejné chování za požáru jako masivní dřevo.“ (Falk, Dietsch, Schmid, 2016) [4]. Ve druhém případě dochází k lokálnímu odpadnutí zuhelnatělé vrstvy (také se označuje jako ztráta lepivosti vrstev), ztrácí se tak část zuhelnatělé vrstvy, která už nechrání další vrstvu proti ohni. Dochází zde i k zvýšenému zuhelnatění. Tato situace je podobná zvýšenému zuhelnatění pozorovaného u chráněných povrchů dřeva po selhání požárně ochranného obložení. Pro tento případ se navrhuje dvojnásobná rychlost zuhelnatění v prvních 25 mm hloubky i v následujících vrstvách, když dojde k odpadnutí první vrstvy CLT panelu, viz *Obr. 2 a Fig. 2* [5].



Obr. 2 Rychlost odhořívání horizontálně uspořádaného CLT panelu [5]
Fig. 2 Charring rate of a horizontally arranged CLT panel [5]

SPOJOVACÍ LEPIDLA

Lepidla jsou součástí CLT panelu slouží k pospojování jednotlivých lamel mezi sebou. Nejčastěji se používají jednosložková polyuretanová lepidla (PUR), která jsou bez formaldehydu, lepidla fenolického typu (PRF) nebo emulzní polymer isokyanát (EPI).

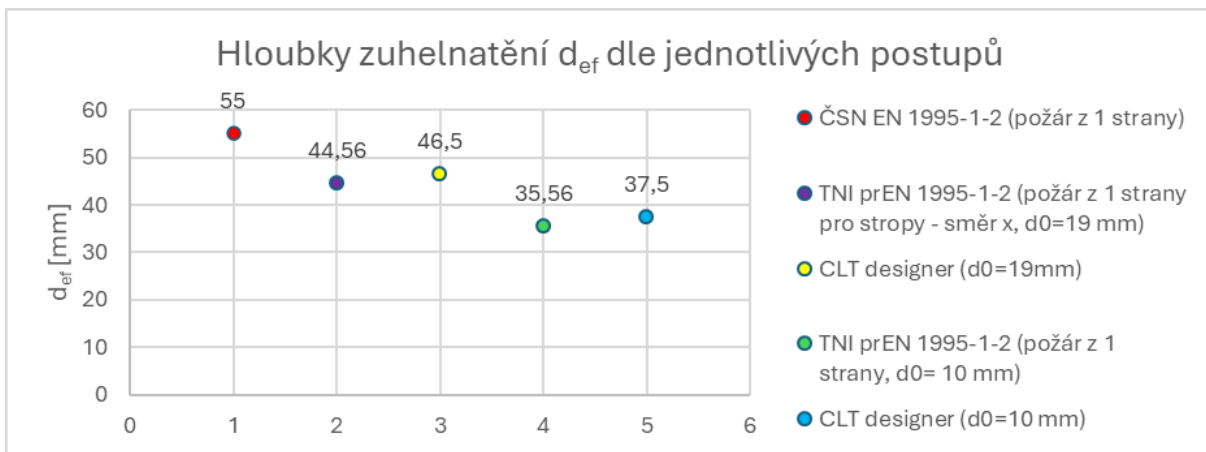
Při požární zkoušce v laboratoři FPInnovations v Québecu bylo testováno křížem vrstvené dřevo z borovice douglasky. Připraveno bylo devět vzorků o rozměrech 150 mm na šířku a 160 mm na výšku, tloušťka byla 40 mm. Připraveno bylo devět vzorků. Pro vzorky byly použity tři lepidla: PUR2, MP (akrylátové lepidlo) a PRF [6].

Během zkoušky byly vzorky vystaveny požáru dle teplotní křivky CAN/ULC S101. Zkouška byla nastavena tak, aby termočlánky uvnitř vzorků nepřesáhly teploty 300 °C. Jelikož se zkoumalo chování při zuhelnatění na vzorky nebylo aplikováno žádné zatížení. Požární zkouška byla ukončena po 196 minutách kvůli prohořených podpůrných prvků. Při této studii nejlépe vyšly lepidla PRF. Za současné kritérium se bere 3 mm, což je 1 % z celkové délky spojovacích linií lamel podle přílohy A.2 CSA O177 [6]. U lepidla PRF byly pozorovány délky odlepování 0,9 mm a 1,5 mm, což představuje 0,5 % až 0,75 % odlepování. Na základě toho byl požadavek zvýšen na kritérium 1,5 %, což vede na 3 mm. I když lepidlo PUR2 selhalo o 0,5 mm, výsledky této studie podporuje současné kritérium 3 % pro lepení lamel u CLT panelů. V této studii selhal pouze jeden vzorek s lepidlem PUR2 s maximální délkou odlepování 3 mm [7].

ŘEŠENÝ PŘÍKLAD

V řešeném příkladu se zabývám porovnáním pro návrh křížem vrstveného dřeva dle normy ČSN EN 1995-1-2 a přednormy TNI prEN 1995-1-2 a návrhovém programu CLT designer.

Dle grafu viz Obr. 3 a Fig. 3 jsou hodnoty d_{ef} označeny postupně číselně jak je v popisu slovně dle jednotlivých metod pod sebou. U normy ČSN EN 1995-1-2 vychází hodnota $d_{ef}=55$ mm, která je na straně bezpečné, oproti TNI prEN 1995-1-2 a programu CLT designer. Z důvodů, jak už je zmíněno výše, hodnoty jsou brány pro rostlé dřevo z jehličnatých dřevin a buku, které uživatelé pro navrhování brali. Hodnoty pro přednormu TNI prEN 1995-1-2 vychází dost podobně jako podle programu CLT designer, což nám vypovídá o více realistickém chování křížem vrstveného dřeva. Je to způsobeno, tím že se v nové přednormě a programu berou hodnoty přímo pro křížem vrstvené dřevo.



Obr. 3 Hloubky zuhelnatění d_{ef} dle jednotlivých postupů
Fig. 3 Charring depths d_{ef} according to individual procedures

U normy ČSN EN 1995-1-2 při výpočtu únosnosti za požár se používá metoda redukovaného průřezu nebo metoda redukovaných vlastností. Do výpočtu účinné hloubky zuhelnatění d_{ef} , tak vstupují pouze parametry pro vrstvu nulové pevnosti d_0 , návrhová hloubka zuhelnatění $d_{char,n}$ a součinitelem pro chráněné a nechráněné prvky k_0 . Hloubka zuhelnatění $d_{char,n}$ se vypočítá s parametry jako jsou doba vystavení účinkům požáru t a nominální návrhovou rychlostí zuhelnatění β_n nebo jednorozměrnou rychlostí zuhelnatění β_0 [2].

U přednormy TNI prEN 1995-1-2 se zbytkový průřez určí buď podle evropského modelu zuhelnatění nebo pokročilých výpočtů. Popisují se i jednotlivé fáze zuhelnatění (0 až 4) pro nechráněné a chráněné prvky. Do výpočtu efektivní hloubky zuhelnatění d_{ef} , tak vstupují pouze parametry pro vrstvu nulové pevnosti d_0 a pomyslná hloubka zuhelnatění $d_{char,n}$. Do výpočtu hloubky zuhelnatění $d_{char,n}$ vstupují parametry sumy pro doby fází zuhelnatění t a pomyslných návrhových rychlostí zuhelnatění β_n . Pomyslné návrhové rychlosti zuhelnatění β_n se určují pro jednotlivé fáze jinak a vstupují do nich parametry jako jsou součinitel mezery k_g , ochranný faktor pro fázi 2 k_2 , dodatečný ochranný faktor pro fázi 3 k_3 a základní návrhová rychlost zuhelnatění β_0 [8].

ZÁVĚR

Křížem vrstvené dřevo představuje moderní a rychlejší výstavbu v oblasti stavitelství z dřevěných konstrukcí. V České republice se tato možnost výstavby neustále zvyšuje z hlediska už zmíněné rychlosti výstavby, udržitelné výstavby a ekonomiky. V poslední řadě se zvyšuje i tlak na používání dřevěných materiálů na výstavbu ať už z pohledů investorů nebo uživatelů. Navrhování dřevěných konstrukcí je tak důležitější než kdy dříve. Problematiku tak musí řešit i obor požární bezpečnost staveb.

Nová přednorma TNI prEN 1995-1-2 přináší navrhování dřevěných konstrukcí na účinky požáru i pro křížem vrstvené dřevo, podle ČSN EN 1995-1-2 tomu tak není. Křížem vrstvené dřevo se pro navrhování podle ČSN EN 1995-1-2 uvažuje pouze jako rostlé dřevo z jehličnatých dřevin a buku a uživatelé berou hodnoty pro tento druh dřeva.

LITERATURA

- [1] 11. Hoření dřeva a jeho ochrana proti ohni. [online]. In: . Dostupné z: drevvari.humlak.cz.
- [2] ČSN EN 1995-1-2, Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí-Část 1-2: Obecná pravidla-Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006, 68 s. Třídící znak 73 1701.
- [3] HA TRUONG DI LE a MENGTING TSAI. *Experimental assessment of the fire resistance mechanisms of timber-steel composites*. [online]. 2019. Licence: CC BY 4.0. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma12234003>.
- [4] FALK, Andreas; DIETSCH, Philipp a SCHMID, Joachim. *Cross Laminated Timber - A competitive wood product for visionary and fire safe buildings*. [online]. Stockholm, 2016. ISBN 978-91-7729-043-8. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/337925537_Cross_Laminated_Timber_-_A_competitive_wood_product_for_visionary_and_fire_safe_buildings.
- [5] STORAENSO. *CLT - Cross laminated timber: Požární bezpečnost*. [online]. 01/2014 AG. 2014. Dostupné také z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.cltcz.info/wp-content/uploads/14.01.27_CLT_Pozarni-bezpecnost_CZ.pdf.
- [6] Canadian Standards Association. QUALIFICATION CODE FOR MANUFACTURERS OF STRUCTURAL GLUED-LAMINATED TIMBER. In: . 2006, s. 63. ISBN 1-55436-013-7. ISSN CSA O177-06 (R2020).
- [7] DAGENAIS, Christian; RANGER, Lindsay a BENICHO, Nouredine. *Fire performance of cross-laminated timber with adhesives*. [online]. *WCTE2021*. 2019, article 301013085, s. 10. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/333648016_fire_performance_of_cross-laminated_timber_with_adhesives_conforming_to_2018_edition_of_ansi-apa_prg-320.
- [8] TNI prEN 1995-1-1, Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-2: Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023, 186 s. Třídící znak 73 1701.

VÝSTŘIKOVÉ CHARAKTERISTIKY SPRINKLEROVÝCH HLAVIC

SPRAY CHARACTERISTICS OF SPRINKLER HEADS

Bc. Peter Tarr

Abstract

This seminar paper deals with the study and comparison of the characteristics of sprinkler heads, which are a key component of a sprinkler fire extinguishing system (SHZ). The first part of the thesis is devoted to a thorough introduction to the operation and principles of the whole SHZ, with emphasis on the role and effectiveness of sprinkler heads. Subsequently, the thesis focuses on the implementation of experiments to compare the eccentric characteristics of the sprinkler heads, based on pressure or height. These experiments will be used to collect data and assess the effectiveness and reliability of different types of warheads under different conditions and scenarios. The results of these experiments will be analyzed and discussed to provide a comprehensive view of the characteristics and performance of sprinkler warheads within the SHZ.

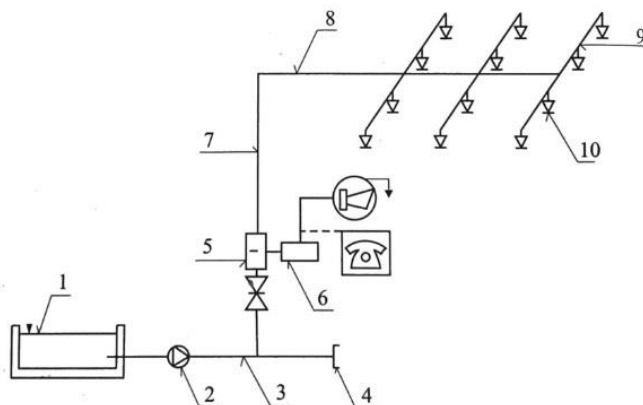
Key words: stable extinguishing equipment; fire; extinguishing efficiency; injection characteristic; extinguishing; fire protection

ÚVOD

Cílem této práce je poskytnout rozšířené informace a poznatky týkající se výstřikových charakteristik sprinklerových hlavice, pomocí podrobné rešerši a experimentů.

STABILNÍ HASÍCÍ ZAŘÍZENÍ

Stabilní hasící zařízení (SHZ) představuje integrovaný systém, který je navržen k účinnému a spolehlivému potlačení požárových situací v počátečních fázích jejich vzniku, proto je zařazován do aktivní požární ochrany a také patří do vyhrazených požárně bezpečnostních zařízení. Jeho charakteristika zahrnuje kombinaci několika komponentů, jako jsou hasící látky, tlakové nádoby, čerpadla a potrubní systémy, které spolupracují s cílem poskytnout rychlou a efektivní reakci na vzniklé ohniska. Tento komplexní systém je navržen s důrazem na bezpečnost, spolehlivost a účinnost, čímž zajišťuje ochranu životů a majetku v případě požární hrozby.

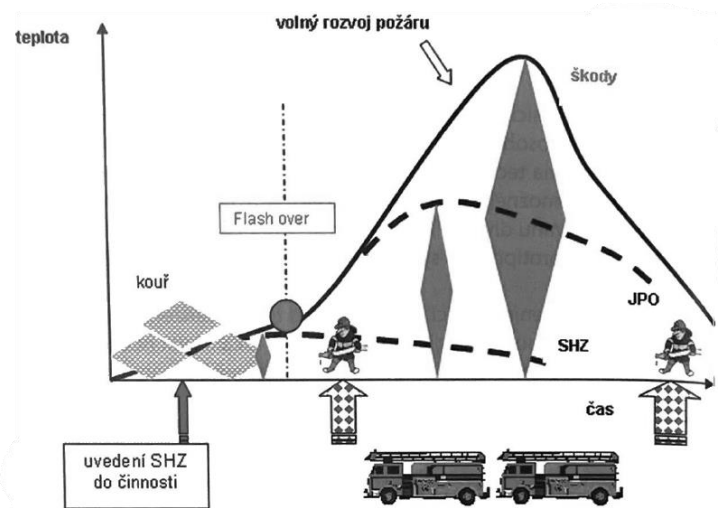


Obr. 1 Typické schéma sprinklerového zařízení [1];
Fig. 1 A typical diagram of a sprinkler system

CHARAKTERISTIKA SPRINKLEROVÝCH ZAŘÍZENÍ

Sprinklerový systém je určen k detekci a kontrole požáru. K hašení požáru obvykle využívá vodu ve formě sprchového proudu aplikovaného přes trysky známé jako sprinklery. Ty se samovolně aktivují, až když dosáhnou tzv. otevírací teploty [2]. Standardní sprinklerový systém se skládá z komponentů pro dodávání vody nebo pěnového roztoku, elektrického napájení, monitorovacího

zařízení a sprinklerové soustavy. Sprinklerové soustavy se skládají z ventilových stanic, hlavního rozdělovače a rozvodného potrubí, které jsou pevně spojeny s konstrukcí budovy. Sprinklery jsou umístěny na rozvodném potrubí, aby se zajistilo rovnoměrné pokrytí chráněného úseku vodou. V některých typech sprinklerových systémů je součástí sprinklerového systému také elektrická požární signalizace nebo jiný detekční systém pro ovládání ventilových stanic.



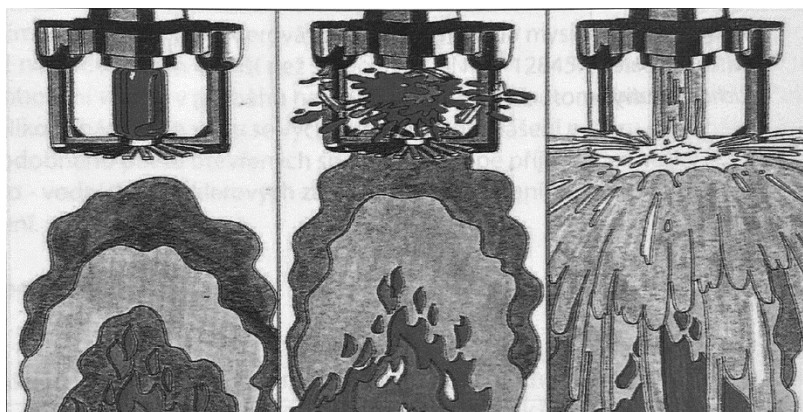
Obr. 2 Závislost výše škod na době rozvoje požáru při hašení SHZ a jednotkou PO [1];
Fig. 2 Dependence of the amount of damage on the time of fire development when extinguishing SHZ and Fire safety unit

VÝSTŘIKOVÁ CHARAKTERISTIKA

Sprinklerové hlavice jsou klíčovou součástí stabilních hasících zařízení (SHZ), jejichž výstřikové charakteristiky jsou určeny několika faktory. Tvar tříštiče sprinklerové hlavice je navržen tak, aby optimalizoval distribuci vody po celé chráněné ploše, čímž se maximalizuje účinnost hašení. K-faktor (K) slouží pro klasifikaci a porovnání všech výstřikových koncovek na vodu, jelikož srovnatelné vyjadřuje průtok (Q) na sprinkleru při tlaku (p) 1 bar (0,1 MPa). Tento faktor je klíčový pro správný výpočet požadovaného průtoku vody při daném tlaku. [3]

$$Q = K * (p)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Tlak působící vody je další kritický parametr, který ovlivňuje dosah a rovnoměrnost rozptýlu vody. Správná kombinace tvaru tříštiče, K-faktoru a tlaku vody zajišťuje, že sprinklerový systém bude efektivně potlačovat požár. Při návrhu a instalaci sprinklerových systémů je důležité pečlivě zohlednit všechny tyto faktory, aby byl zajištěn maximální výkon a bezpečnost.



Obr. 3 Otevření sprinkleru při dosažení otevírací teploty [4]
Fig. 3 Opening the sprinkler when the opening temperature is reached

Tab. 1 Otevírací teploty a barevné označení sprinklerů dle ČSN EN 12 259-1 [2]

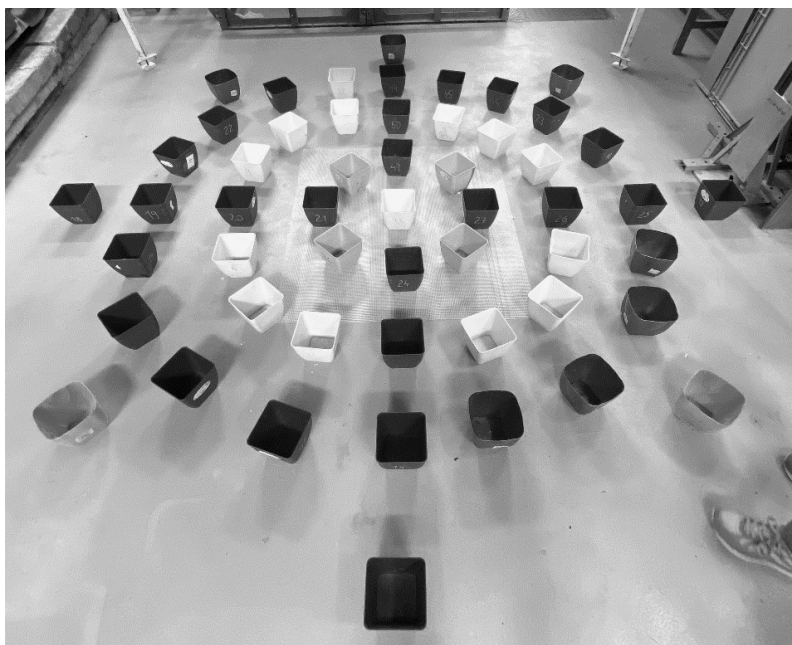
Tab. 1 Opening temperatures and color marking of sprinklers according to ČSN EN 12 259-1

Sklenná poistka			Tavná poistka	
Otvárací teplota [C°]	Farba	Najvyššia otváracia teplota [C°]	Rozsah otváracej teploty [C°]	Farba
57	oranžová	74	55 - 77	bez označenia
68	červená	86		
79	žltá	99	80 - 107	biela
93	zelená	113		
100	zelená	120		
121 a 141	modrá	141	121 - 149	modrá
163 a 182	svetlo fialová	186	163 - 191	červená
204	čierna	228	204 - 246	zelená

EXPERIMENTY V RÁMCI SEMINÁRNÍ PRÁCE

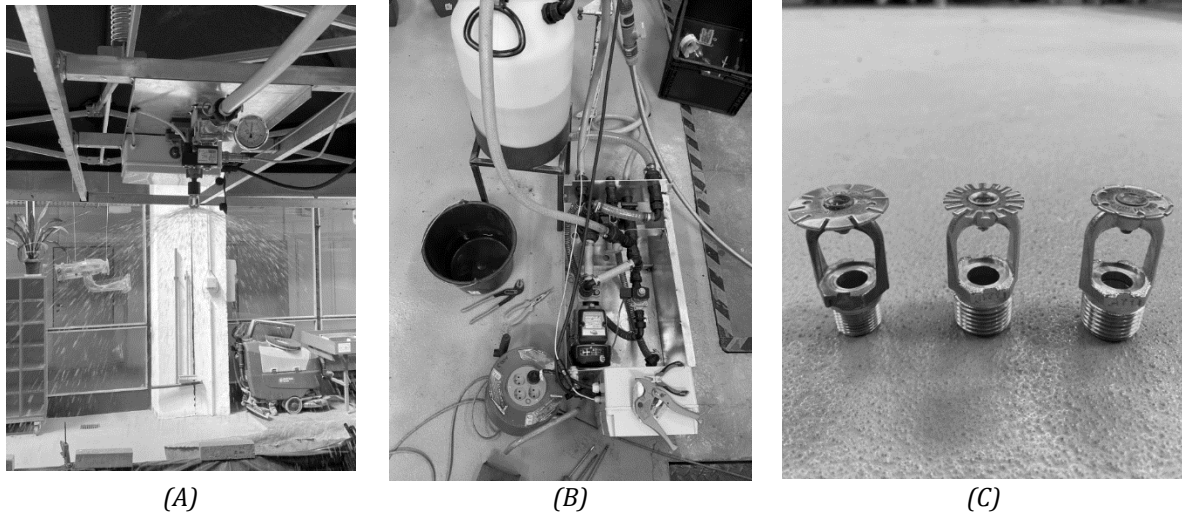
Pro svůj experiment jsem zvolil kelímkový test, který slouží k měření distribuce vody ze sprinklerové hlavice. Testuji se třemi sprinklerovými hlavicemi. V rámci tohoto testu budou kelímky rozmístěny podle schématu sdružených kružnic, což umožní zachytit co nejvíce vody na záchytné ploše (viz obr. 4). Tato metoda zajišťuje rovnoměrné pokrytí měřené plochy a přesnější výsledky ohledně distribuce vody. Každý kelímek bude umístěn ve specifické vzdálenosti od sprinkleru, což nám umožní analyzovat různé zóny výstřiku. Měření bude probíhat při různých hodnotách tlaku vody, aby bylo možné zhodnotit vliv tlaku na výstřikové charakteristiky. Nasbíraná data z kelímků nám umožní určit, jak dobře sprinklerová hlavice pokrývá danou oblast a zda je rozptyl vody dostatečně rovnoměrný.

V experimentu jsme dokončili první zkoušku, a to v prostorách vodohospodářského experimentálního centra ČVUT v Praze, kde pomocí dešťníkového simulátoru (viz. obr. 5 A), výkonného čerpadla (max. výkon 1,4 bar) (viz. obr. 5 B) a třech sprinklerových hlavic (viz. obr. 5 C), jsme otestovali výstřikovou charakteristiku, při tlaku 0,5 bar, 1 bar a 1,4 baru. Sprinklerovou hlavici jsme umístili do výšky 2 m a pro každou hlavici a tlak, jsme udělali tři zkoušky, celkově pro jednu výšku 36 zkoušek. Pro zachycení vody jsme použili 53 kelímků o rozměru 200 × 200 mm. Pro zvážení kelímků jsme použili váhu Adventure-Pro..



Obr. 4 Rozmístění kelímků podle schématu sdružených kružnic

Fig. 4 Placement of cups according to the scheme of combined circles



Obr. 5 (A) Mobilní deštníkový simulátor; (B) Čerpadlo o max. výkonu 1,4 bar; (C) Použité sprinklerové hlavice pro experiment

Fig. 5 (A) Mobile umbrella simulator; (B) Pump with a maximum output of 1.4 bar; (C) Used sprinkler heads for the experiment

ZÁVĚR

Pro dokončení našeho experimentu nám schází provést testy při dvou dalších výškách. Při těchto výškách bychom chtěli otestovat různé počty sprinklerů a různé tlaky vody. Pokud bychom měli možnost testovat s výkonnějším čerpadlem, mohli bychom upřesnit výstřikovou charakteristiku vybraných sprinklerů. Data, která jsme zatím získali, nyní zpracováváme, abychom identifikovali oblasti s největším a nejmenším pokrytím vody. Tyto informace jsou klíčové pro optimalizaci výkonu sprinklerového systému a zajištění rovnoměrného rozptylu vody při hašení požárů. Další testy nám pomohou lépe porozumět vlivu výšky instalace, počtu sprinklerů a tlaku vody na efektivitu distribuce vody. Celkově očekáváme, že výsledky našeho experimentu přispějí k lepšímu návrhu a implementaci stabilních hasících zařízení.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat paní inženýrce Pavle Hofbauer Pechové za vedení seminární práce a taky pomoc při experimentu. Děkuji Ing. Kláře Slávkovskej a Bc. Pavlovi Zbožkovi za úsilí a pomoc při experimentu.

LITERATURA

- [1] RYBÁŘ, Ing. Pavel. *Stabilní hasící zařízení vodní a pěnová*. Ostava: Profesionální komora požární ochrany, 2013. Edice PKPO.
- [2] ČSN EN 12259 -1+A1, Stabilní hasící zařízení – Komponenty pro sprinklerová a vodní sprejová zařízení – Část 1: Sprinklery. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020, 2002.
- [3] ČSN EN 12845+A1, Stabilní hasící zařízení – Sprinklerová zařízení – Navrhování, instalace a údržba. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020. květen 2020
- [4] RYBÁŘ, Ing. Pavel. *Sprinklerová zařízení*. 1. vydanie. Ostrava: Shružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2011.

TESTOVÁNÍ SPECIÁLNÍHO DRUHU SPRINKLEROVÉ HLAVICE

TESTING A SPECIAL TYPE OF SPRINKLER HEAD

Bc. Denis Tomeš

Abstract

The first part of this article is devoted to the fire extinguishing system and its parts, first of all to special types of sprinkler heads. It describes alternative ways of activating sprinkler heads pyrotechnically or electrically. Then, the functional test according to the European standard and the international standard is compared. The second part of the paper focuses on the preparation and the course of the experiment for testing a special kind of sprinkler head with an R-bulb heat bulb. The result of the testing will be the determination of the most suitable protective layer of the R-bulb bulb using a modified function test.

Key words: *Sprinkler head; fire sprinkler system; glass thermal bulb; bulb activation; thermal bulb processing technology; electrically operated fire sprinklers.*

ÚVOD

Ze strany pojišťoven a ochrany osob je v dnešní době kladen stále větší důraz na instalaci samočinného hasícího zařízení do objektů, a proto je toto téma s ohledem na jeho výskyt velmi důležité. Snahou požární bezpečnosti staveb je zajistit maximální bezpečnost unikajícím osobám a zajistit včasnou detekci požáru a co nejdříve zahájit hašení požáru pro potlačení požáru už v jeho rozvoji a zamezit tak i velkým ztrátám na majetku. Má hlavní motivace je podílet se na vývoji elektricky ovládaných sprinklerových hlavice, které mohou být oproti standartním hlavicím aktivovány z externího zdroje, a tím efektivněji hasit požár a ochránit osoby a majetek.

POŽÁRNÍ BEZPEČNOST STAVEB

Požární bezpečnost staveb se rozděluje na dvě části. První částí je tzv. pasivní požární ochrana neboli schopnost budovy odolávat účinkům požáru díky konstrukčnímu a dispozičnímu řešení. Pasivní ochrana je doplněna prvky aktivní požární ochrany. To jsou požárně bezpečnostní zařízení (PBZ), která mají za úkol snižovat či potlačovat účinek požáru už ve fázi rozhořívání. Do této části požární bezpečnosti staveb spadá samočinné stabilní hasící zařízení (SHZ) nebo dále elektrická požární signalizace (EPS) či zařízení pro odvod kouře a tepla (ZOKT).

STABILNÍ HASICÍ ZAŘÍZENÍ

Stabilní hasící zařízení (SHZ) patří mezi nejvýznamnější aktivní požárně bezpečnostní zařízení. Podle Vyhlášky č. 246/2001 Sb., která stanovuje podmínky pro požární bezpečnost a státní požární dozor (dále jen „vyhláška o požární prevenci“), ve znění pozdějších předpisů, stabilní hasící zařízení se řadí mezi vyhrazená požárně bezpečnostní zařízení. [1] SHZ je jediné PBZ, které aktivně hasí požár. [2]

SHZ lze nejčastěji nalézt v garážích, obchodních centrech, knihovnách, divadlech či skladech. Velkou výhodou SHZ, které je velmi často navrženo jako samočinné, je schopnost zahájit hasební zásah bez lidského faktoru.

SPRINKLEROVÉ SHZ

Je nejpoužívanějším druhem SHZ, u kterého se nejčastěji používá jako hasební látka voda. Někdy se také voda mísí s pěnou. Voda je velmi výhodné hasivo z hlediska její dostupnosti, měrné tepelné kapacity, neutralitě a nejedovatosti.

Při požáru se sprinklerová hlavice aktivuje jejím ohřátím na otevírací teplotu. Po aktivaci sprinklerové hlavice dochází k rozptýlení vody do ohniska požáru. Poklesem tlaku v potrubí se otevře

ventilová stanice a dojde k aktivaci požárního čerpadla, které dále zajišťuje dostatek vody k hašení. Hašení probíhá pouze z těch hlavíc, u kterých bylo dosaženo otevírací teploty. Celý proces hašení je automatický, pouze požární čerpadlo se musí po požáru vypnout ručně. [3]

ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ SPRINKLEROVÝCH HLAVIC DLE DRUHU AKTIVACE

V České republice i ve zbytku Evropy je nejrozšířenějším druhem aktivace sprinklerové hlavice skleněná baňka. Baňka obsahuje kapalinu, která vlivem narůstající teploty zvětšuje svůj objem až do stavu roztržení baňky. Uvnitř baňky je z počátku také vzduchová bublina. Dle její velikosti se mění výše teploty (tzv. otevírací teplota), při které dochází k prasknutí baňky. Baňky jsou barevně rozděleny dle teplot, při kterých dochází k jejich aktivaci.

Alternativou baňky je tavná pojistka. U tavné pojistky jsou dva plíšky spojené pájkou. Při dosažení určité teploty dochází k jejímu roztavení a následkem toho se plíšky od sebe oddělí a dojde k aktivaci hlavice. S tavnými pojistkami se setkáme spíše u průmyslových budov, kvůli jejich neestetickému vzhledu. Více se využívají v USA.

SPECIÁLNÍ DRUHY AKTIVACE - DVOJÍ AKTIVACE

Speciální druhy aktivace nabízejí mimo základní aktivace i aktivaci sekundární, například pyrotechnická či elektrická aktivace. Může se jednat tedy o řízenou aktivaci a spuštění hlavice je provedeno prostřednictvím řídicího panelu nebo lokálním čidlem napojeným přímo na hlavici.

JOB Group

Firma JOB group, GmbH patří mezi světovou špičku firem zabývajících se požární bezpečností. Byla založena roku 1958 Eduardem J. Jobem. Jedná se o německou firmu, která se nyní zaměřuje především na výrobu skleněných baňek. V roce 2020 přišla firma s novou inovativní sprinklerovou baňkou nazvanou R-bulb, kterou lze díky vodiči aktivovat i elektricky.

R-BULB - JOB SMART BULB

Aktivace může být provedena buď klasickým způsobem pomocí tepelné baňky anebo elektricky vyslaným signálem z externího zdroje. Každá hlavice má svůj modul, na který je napojena, dále všechny moduly jsou napojeny na hlavní ovládací panel. Aktivace může probíhat také teplotním hlásičem, který po zpozorování požáru vyšle signál do ovládacího panelu a ten aktivuje předem naprogramované hlavice. [4] Hlavice s baňkou R-bulb je na Obr. 1.

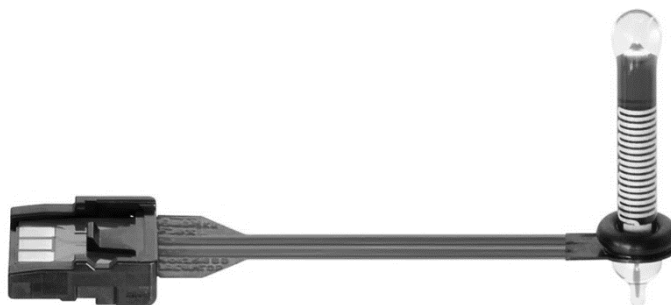


*Obr. 1 Sprinklerová hlavice s baňkou R-bulb
Fig. 1 R-bulb sprinkler head*

Ovládací panel je srdcem celého systému a slouží pro naprogramování kde a kolik se po zpozorování požáru aktivuje hlavice. Lze naprogramovat přesný počet hlavíc, které se aktivují okolo místa vzniku požáru nebo se mohou například aktivovat všechny. Záleží na mnoha faktorech, jako na provozu, dispozici objektu a dalších kritériích.

Modul je napojen vodiči přímo na skleněnou baňku a v případě příjmu signálu z ovládacího panelu aktivuje tepelnou baňku. Aktivace funguje na stejném principu teplotní roztažnosti kapaliny v baňce, kdy dojde na její operativní teplotu. Baňka ovšem není ohřívána požárem, ale je ohřívána teplem, které vzniká při průchodu elektrického proudu vodičem.

U následujícího systému je ve sprinklerové hlavici instalována běžná skleněná baňka jen s jedním rozdílem, a to že baňku obepíná vrstva pokovení ze slitiny stříbra. Vrstva pokovení vede z dolní části baňky na jedné straně klikatě zleva doprava, a pak pokračuje na druhé straně obdobně a končí na protilehlé straně baňky, než začínala. Směr a velikost klikatice vrstvy pokovení může vést i ve vertikálním směru zdola nahoru. Baňka s vodičem je znázorněna na Obr. 2.



Obr. 2 R-bulb baňka s vodičem pro napojení na modul [4]
Fig. 2 R-bulb bulb with wire for connection to the module [4]

Vodič z modulu je k baňce připevněn přesně v místech pokovení ve spodní části baňky. Pro pevnou pozici vodiče a baňky a zároveň zajištění funkčnosti hlavice je na baňku nasazeno pomocné gumové těsnění. Pozici a propojení vodiče s pokovením baňky kromě gumového těsnění zajišťuje také ochranná vrstva lepidla, která je nanášena po celém povrchu baňky a těsnění. Ochranná vrstva také zajišťuje ochranu pokovení baňky před vnějšími vlivy.

ZKOUŠKA FUNKCE SPRINKLEROVÉ HLAVICE DLE PŘEDPISŮ

Každá sprinklerová hlavice musí před uvedením na trh splnit celou řadu zkoušek a kritérií. Ve světě definuje základní normové zkoušky sprinklerových hlavíc například norma řady ISO 6182-1. Pro použití sprinklerových hlavíc v České republice musí hlavice podstoupit definované zkoušky, které udává norma ČSN EN 12259-1+A1. Jednou ze základních zkoušek je právě zkouška funkce.

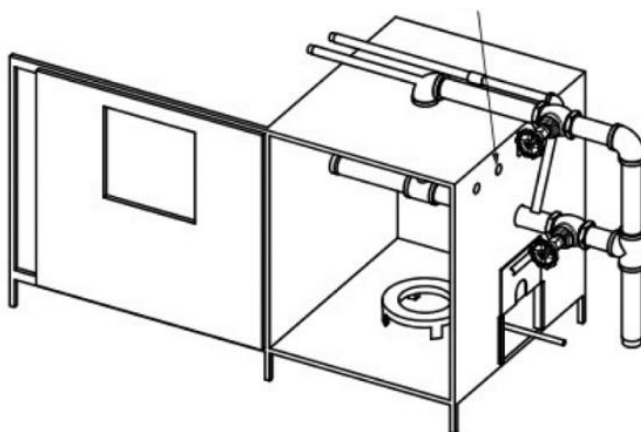
Zkouška funkce je v normě definována dle článku 4.6.1. Článek říká, že při zkouškách podle E.1, kde se hlavice zahřívají v peci, se sprinkler musí otevřít a do 5 s od uvolnění tepelně citlivé části musí správně fungovat. Všechny uvolněné zachycené části musí být odstraněny do 60 s od uvolnění tepelně citlivé části. Při zkušebním tlaku 0,35 bar je největší podíl vzorků, u kterých došlo k zachycení fragmentů 1 z 12. Tedy každý druh a tlak hlavice musí být odzkoušen minimálně na 11 vzorcích. [5]

Mezinárodní norma ISO 6182-1 definuje zkoušku funkce neboli lodgement test následovně: „Sprinkler se musí otevřít a všechny uvolněné části musí být odstraněny během 60 s od aktivace prvku reagujícího na teplo. Pokud dojde k zaseknutí při jakékoliv úrovni tlaku a zkušebním uspořádání, musí se v tomto uspořádání a při tomto tlaku vyzkoušet 25 dalších sprinklerů.“ [6]

ZKOUŠKA FUNKCE SPRINKLEROVÉ HLAVICE S R-BULB

Při zvolení špatného typu ochranného nátěru baňky může dojít k nesprávné funkci sprinklerové hlavice, a tedy i ke znemožnění hasební schopnosti SHZ. Výsledkem plánované zkoušky je snaha vybrat nejvhodnější druh ochranného nátěru, aby bylo toto riziko minimalizováno a byla zajištěna bezpečnost a správná funkce sprinklerových hlavíc.

Zkouška bude provedena ve speciálním zkušebním zařízení pro testování sprinklerových hlavice (Obr. 3), definovaná normou ČSN EN 12259-1+A1, příloha E.



Obr. 3 Zkušební pec pro zkoušku sprinklerových hlavice [5]
Fig. 3 Test furnace for sprinkler head test [5]

Zkouška bude provedena dle normových postupů, ale bude přizpůsobena očekávaným výstupům dle požadavků od německé firmy JOB group, GmbH. Zavěšená sprinklerová hlavice bude umístěna pod stropem. Hlavice bude přírodním potrubím napojena na čerpadlo, které vyvíjí konstantní tlak $0,35 \pm 0,05$ baru. K aktivaci hlavice bude docházet vždy plameně pomocí nádoby se zapáleným heptanem. Dle zkušebního postupu do 5 sekund od aktivace hlavice musí začít proudit voda na tříštič. Po 60 s od aktivace hlavice dochází k vypnutí čerpadla a ukončení zkoušky. V této fázi nesmí žádné části baňky ani operativních částí překážet v prostoru pro proud vody z hlavice na tříštič. Po vypnutí čerpadla přichází na řadu fotodokumentace daného vzorku baňky s ochranným nátěrem. Dle fotodokumentace bude následně zhodnoceno, jestli daný vzorek zkouškou funkce prošel či nikoliv.

Celkem je v první fázi naplánováno odzkoušet 10 sprinklerových hlavice s R-bulb. Otestovány budou dva druhy ochranné vrstvy baňky. V první fázi bude testováno 5 kusů baňky s označením Epoxidharz a následně se přejde k testování dalších 5 vzorků, tentokrát s označením K70.

ZÁVĚR

Elektricky ovládané sprinklery jsou velkým přínosem pro požární bezpečnost staveb, především kvůli možnosti aktivace sprinklerové hlavice z externího zdroje. Díky možnosti naprogramování ovládacího panelu může dojít k efektivnějšímu zkrápění prostoru a tím k uhašení požáru už v jeho rané fázi. Proto se budu v diplomové práci dále věnovat zkoušení elektricky ovládané sprinklerové hlavice se zaměřením na její správnou funkci k zajištění větší bezpečnosti osob a snížení ztrát na majetku.

LITERATURA

- [1] *Vyhláška č. 246/2001 Sb. o požární prevenci*
- [2] *ČSN 73 0810 Požární bezpečnost staveb - Společná ustanovení*
- [3] *Sprinklerová stabilní hasicí zařízení - I. díl. TZB-info* [online]. [vid. 2024-04-18]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/pozarni-vodovod/13971-sprinklerova-zarizeni-i-dil>
- [4] *JOB Thermo Bulbs. JOB* [online]. [vid. 2024-03-06]. Dostupné z: <https://www.job-group.com/en/products/job-thermo-bulbs/>
- [5] *ČSN EN 12259-1 +A1: Stabilní hasicí zařízení - Komponenty pro sprinklerová a vodní sprejová zařízení - Část 1: Sprinklery*
- [6] *ISO 6182-1:2021 Fire protection - Automatic sprinkler systems - Part 1: Requirements and test methods for sprinklers*

Zapálení2024
sborník 7. studentské vědecké konference Fakulty stavební ČVUT v Praze

kolektiv vedoucích předdiplomních prací:
Pokorný Marek, Mózer Vladimír, Hejtmánek Petr, Najmanová Hana, Wald František,
Štefan Radek, Pechová Pavla, Cábová Kamila, Velebil Lukáš, Benýšek Martin, Šejna
Jakub, Jogi Marcel

Vydalo: České vysoké učení technické v Praze
Zpracovala: Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra konstrukcí pozemních staveb
Thákurova 7, 166 29, Praha 6
Tisk: online verze

81 strana | první vydání
ISBN 978-80-01-07311-7
Červen 2024