



**Slovenská technická univerzita v Bratislave
Stavebná fakulta**

Ing. Zuzana Kamenická

Autoreferát dizertačnej práce

**Vybrané problémy stanovenia požiarnej odolnosti
drevených prvkov**

na získanie akademického titulu „philosophiaedocor“, v skratke „PhD.“

v doktorandskom študijnom programe:

D-TKeIS4 – Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

v študijnom odbore:

5.1.5 Inžinierske konštrukcie a dopravné stavby

Forma štúdia:

denná

Miesto a dátum:

Bratislava, jún 2018



**Dizertačná práca bola vypracovaná na Katedre kovových a drevených konštrukcií
Stavebnej fakulty STU v Bratislave**

Predkladateľ: Ing. Zuzana Kamenická
Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta
Katedra kovových a drevených konštrukcií
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ: doc. Ing. Jaroslav Sandanus, PhD.
SvF STU v Bratislave, Katedra kovových a drevených konštrukcií

Oponenti: doc. Ing. Magdaléna Štujberová, PhD.
SvF STU v Bratislave, Katedra kovových a drevených konštrukcií
prof. Ing. Anton Osvald, Csc.
Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Žilinská univerzita v Žiline,
Katedra bezpečnostného inžinierstva
Ing. Michal Minár, PhD.
Mitim

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 21.8.2018 o 10:30h.

na Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta
Katedra kovových a drevených konštrukcií, miestnosť A518

Prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan Stavebnej fakulty, STU v Bratislave

Obsah

1	Úvod.....	5
2	Ciele dizertačnej práce	6
3	Porovnanie výsledkov jednotlivých zjednodušených metód pri posúdení na rôzne zaťaženia	6
4	Porovnanie rýchlosti a hĺbky zuhoľnatenia stanovenej pomocou zjednodušených a spresnených výpočtov	7
5	Analytické výpočtové postupy, experiment a numerický model drevo-betónového nosníka.....	8
5.1	Analytické výpočty.....	8
5.1.1	Výpočet rýchlosti uhoľnatenia na základe publikácie (Mikkola, 1991) 8	
5.1.2	Výpočet rýchlosti uhoľnatenia na základe publikácie (Hietaniemi, 2005) 9	
5.2	Experiment drevo-betónového nosníka a jeho numerická analýza	10
5.3	Numerický model na základe experimentu drevo-betónového nosníka	10
5.4	Výsledky a diskusia z porovnania numerických, analytických metód a experimentu drevo-betónového nosníka.....	11
6	Problematika trhlín v dreve pri uhoľnatení.....	13
6.1	Experiment drevených prvkov s trhlinami v Trnave – tepelná analýza	13
6.1.1	Príprava experimentu.....	13

6.1.2	Výsledky experimentu.....	14
6.2	Numerická analýza skúšaných vzoriek, porovnanie s experimentom a diskusia k získaným údajom.....	15
7	Mechanická analýza	16
7.1	Experiment drevených prvkov za bežnej teploty.....	16
7.1.1	Určenie mechanickej odolnosti za požiaru a diskusia k výsledkom.	17
8	Záver	18
8.1	Závery a zhrnutie z dosiahnutých výsledkov	18
8.1.1	Porovnanie zjednodušených metód	18
8.1.2	Numerická analýza drevených prvkov s normalizovanými vlastnosťami	18
8.1.3	Porovnanie analytických a numerických metód pre výpočet rýchlosti uhoľnatenia s výsledkami experimentu drevo-betónového nosníka.....	19
8.1.4	Problematika drevených prvkov s trhlinami vystavených požiaru ...	19
8.1.5	Stanovenie mechanickej odolnosti drevených prvkov za požiaru	20
8.2	Prínos práce pre prax	20
8.3	Prínos práce pre vedu.....	21
8.4	Odporúčania pre ďalší výskum	21
9	Publikácie autorky	22
9.1	Publikácie v procese recenzovania	26
10	Použitá literatúra	27

1 Úvod

Určenie požiarnej odolnosti drevených nosných konštrukcií je významnou súčasťou statického posudku rovnako ako pri iných materiáloch nosných konštrukcií. Pri výpočte je rozhodujúce správne určiť zvyškový prierez, ktorý bude prenášať zaťaženie aj po určitej dobe vystavenia požiaru. Pre určenie tohto prierezu je relevantné stanoviť hĺbku zuhoľnatia, s ktorou súvisí rýchlosť uhoľnatia.

V práci sú po opísaní zjednodušených metód na určenie mechanickej odolnosti drevených konštrukcií za požiaru uvedené porovnania konkrétnych prípadov posúdenia drevených konštrukcií namáhaných rôznymi zaťažzeniami. V rámci kapitoly o numerickej analýze je porovnanie rýchlosti a hĺbky zuhoľnatia pri dreve s rozdielnymi hodnotami objemovej hmotnosti. Analytické výpočty rýchlosti uhoľnatia sú vysvetlené na základe vzťahov od dvoch autorov a ich následné aplikovanie na konkrétny prípad drevo-betónového nosníka. Z tohto nosníka bol vytvorený numerický model a výsledky z numerického modelu boli porovnané s výsledkami z experimentu a s výsledkami z analytických výpočtov.

Rozdiel v rýchlosti uhoľnatia medzi rasteným a lepeným lamelovým drevom, ktorý je uvedený v (STN EN 1995-1-2, 2008), je spôsobený väčším výskytom trhlín v rastennom dreve ako v lepenom lamelovom dreve. Tým nastáva rýchlejšie uhoľnanie dreva. Podľa niektorých autorov (ako napr. (Fornather a kol., 2001) alebo (Frangi a kol., 2010) a iní) je uvedené, že by mal byť zohľadnený vplyv trhlín a medzier od určitej šírky a hĺbky, ale neexistuje návrh ani odporúčania, ako presne zohľadniť tento vplyv.

V práci je popísaná numerická analýza drevených prvkov s trhlinami. Okrem modelov s trhlinami konkrétnych rozmerov sú uvedené aj možnosti zjednodušenia modelov. Porovnané sú výsledky z experimentu s numerickou analýzou. Následne bol uskutočnený experiment pre určenie mechanických vlastností.

2 Ciele dizertačnej práce

Hlavnými tézami tejto dizertačnej práce sú:

- Analýza rozdielov zjednodušených metód. Aplikácia na prípady namáhania drevených prvkov s porovnaním posúdenia podľa zjednodušených metód.
- Numerický model dreveného prvku vystaveného požiaru podľa teplotnej požiarnej krivky. Porovnanie rýchlosti a hĺbky zuhoľnatenia rôznych druhov drevín s rozdielnou objemovou hmotnosťou získaných v programe na báze MKP a tabuľkových hodnôt získaných z normy.
- Analytické výpočty (na základe vzťahov podľa dvoch autorov) a numerické výpočty so vstupnými hodnotami podľa uskutočneného experimentu drevo-betónového nosníka. Vzájomné porovnanie výsledkov. Analýza rôznych vstupných parametrov zadáných podľa rôznych zdrojov.
- Analýza vplyvu trhlín na rýchlosť uhoľnatenia drevených prvkov. Numerické modely a experimentálne analýzy drevených prvkov s trhlinami. Analýza výsledkov, ich porovnanie a vyvodenie záverov.
- Experimentálna analýza mechanických vlastností drevených prvkov. Analýza mechanickej odolnosti drevených prvkov vystavených požiaru.
- Stanovenie vplyvu trhlín, vyvodenie záverov, ich zhrnutie a vytvorenie odporúčaní pre posudzovanie drevených prvkov vystavených požiaru.

3 Porovnanie výsledkov jednotlivých zjednodušených metód pri posúdení na rôzne zaťaženia

Zjednodušené metódy (MÚRP – metóda účinného redukovaného prierezu a MRV – metóda redukovaných vlastností) sú podobné vo výpočte, ale existujú rozdiely vo výsledkoch, hlavne pre pomer napätia k mechanickej odolnosti pri požiaru.

Boli riešené prípady s nasledovnými zadanými hodnotami: dva prierezy 220 mm / 520 mm a 200 mm / 200 mm; tri dĺžky rozpätia 1000 mm, 3000 mm a 6000 mm; dva typy pevnostných tried - C22 GL22h; čas vystavenia požiaru 45 min; redukčný faktor pre zaťaženie 0,6; súčiniteľ vzpernej dĺžky pre oba smery 1,0.

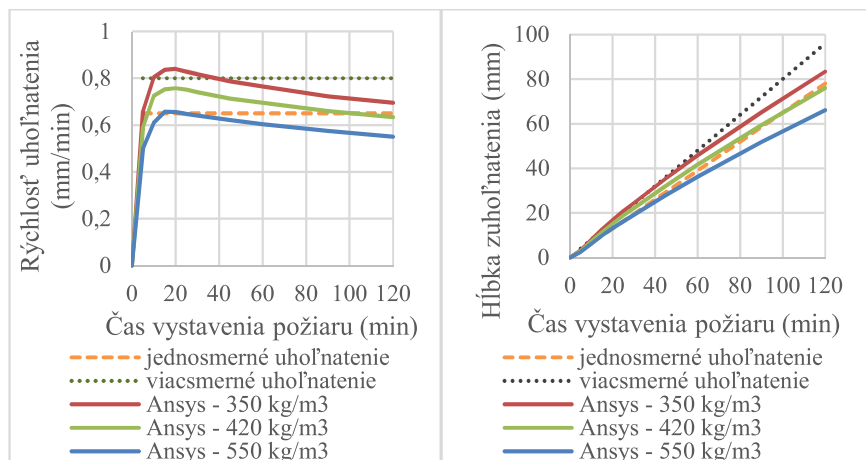
Percentuálny rozdiel je v rozmedzí od 0 do 17 % v závislosti od zadaných parametrov, ako napr. rozpätie, prierez, štihllosť, materiál atď. a tiež v závislosti od posudzovaného zaťaženia. Najmenší rozdiel je v prípade posúdenia prvkov na tlak a v prípade nízkej štihllosti aj na vzper. Vo väčšine prípadov bolo vyššie využitie pri použití MÚRP ako pri MRV. Iba pri posúdení prvkov na ťah a pri menšej štihllosti na tlak bolo vyššie využitie v prípade MRV.

4 Porovnanie rýchlosti a hĺbky uhoľnatenia stanovenej pomocou zjednodušených a spresnených výpočtov

Boli analyzované hĺbky a rýchlosti uhoľnatenia pre rôzne triedy dreva (obr. 4.1). Pri zjednodušených metódach boli hodnoty prevzaté z tab. z normy (STN EN 1995-1-2, 2008). Pri spresnených výpočtových metódach boli uskutočnené numerické modely dreveného prierezu. Objemová hmotnosť bola zvolená ako priemerná hodnota hustoty pre minimálnu, maximálnu a bežne používanú triedu dreva.

Rýchlosť uhoľnatenia pre model v numerickom modeli bola s najnižšou objemovou hmotnosťou po celý čas vystavenia požiaru vyššia ako pre zjednodušenú metódu jednosmerného uhoľnatenia, ale v prípade dreva s najvyššou objemovou hmotnosťou bola takmer celý čas pre model nižšia ako pre zjednodušenú metódu.

Napriek rozdielnosti hodnôt rýchlosti uhoľnatenia v čase pri spresnených a zjednodušených výpočtoch je použitie zjednodušených metód väčšinou dostatočne bezpečné pre výpočet rýchlosti uhoľnatenia v bežných prípadoch. Avšak pri ostatných prípadoch je potrebné uskutočniť ďalší výskum.



Obr. 4.1: Rýchlosť uhoľnatenia (vľavo) a hĺbka zuhoľnatenia (vpravo) mäkkého rasteného dreva zjednodušenými metódami a numerickým modelom

5 Analytické výpočtové postupy, experiment a numerický model drevo-betónového nosníka

5.1 Analytické výpočty

5.1.1 Výpočet rýchlosti uhoľnatenia na základe publikácie (Mikkola, 1991)

Štúdia v publikácii (Mikkola, 1991) analyzuje uhoľnatenie pomocou kónického kalorimetra na viac ako 50 vzorkách zo smrekového a borovicového dreva, drevotrieskovej dosky, preglejky z brezy a drevovláknitej dosky. Je tu vysvetlený prenos tepla z plameňov požiaru na povrch drevených prvkov a zároveň do samotného prierezu dreveného prvku.

Rýchlosť uhoľnatenia môže byť vypočítaná podľa (Mikkola, 1990) ako:

$$\beta = \frac{q_e - q_L}{\rho \cdot \{c_{O_0} \cdot (T_p - T_0) + L_v + [(c_w - c_{O_0,1}) \cdot (T_v - T_0) + L_{v,w}] \cdot w\}} \quad (5.1)$$

c_{O_0} – merná tepelná kapacita dreva medzi teplotami T_0 a T_p (J/(kg.K))

c_w – merná tepelná kapacita vyparenia vody (J/(kg.K))

$c_{O,1}$ – merná tepelná kapacita, ktorá je vyjadrená spriemerovaním merných tepelných kapacít pri teplote 20 °C a 99 °C (J/(kg.K))

T_v – teplota, pri ktorej sa vyparí voda (100 °C)

q_e – čistý tepelný tok na jednotku plochy povrchu (podľa (STN EN 1991-1-2, 2007) je označovaný ako h_{net}) (W/m²)

q_L – tepelné straty na zuhoľnatom povrchu (W/m²)

T_p – priemerná teplota vrstvy pyrolýzy (360 °C)

T_0 – počiatočná teplota (20 °C)

ρ – objemová hmotnosť dreva (kg/m³)

L_v – teplo, pri ktorom sa vyparí suché drevo (J/kg)

$L_{v,w}$ – teplo, pri ktorom sa vyparí voda (J/kg)

w – vlhkosť dreva (%)

5.1.2 Výpočet rýchlosti uhoľnatenia na základe publikácie (Hietaniemi, 2005)

V publikácii (Hietaniemi, 2005) bol vytvorený nasledujúci vzťah pre výpočet rýchlosti uhoľnatenia, ktorý je závislý od času vystavenia požiaru:

$$\beta = \frac{f(\chi_{O_2}, t) \cdot (C \cdot q_{std}(t)^p)}{(\rho + \rho_0) \cdot (A + B \cdot w)} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5.2)$$

$f(\chi_{O_2}, t)$ – faktor závislý od koncentrácie kyslíka (-)

A – parameter; min. 505 kJ/kg, max. 1095 kJ/kg (použitá hodnota 800 kJ/kg)

B – parameter; min. 2430 kJ/kg, max. 2250 kJ/kg (použitá hodnota 2490 kJ/kg)

C – parameter, ktorý bol získaný z konštantného tepelného toku; min. 2,72 kW/m², max. 5,45 kW/m² (použitá hodnota 3,93 kW/m²)

$q_{std}(t)$ – tepelný tok (kW/m²)

p – parameter; priemerná hodnota 0,5 s odchýlkou 0,04 (použitá hodnota 0,5)

ρ – objemová hmotnosť dreva (512 kg/m³)

STU

ρ_0 – objemová hmotnosť suchého dreva (457 kg/m³)

w – vlhkosť dreva (12 %)

t – čas vystavenia požiaru (min)

τ – časová konštanta; min. 90 min, max. 110 min (použitá hodnota 100 min)

5.2 Experiment drevo-betónového nosníka a jeho numerická analýza

V skúšobni spoločnosti PAVUS a.s. (vo Veselí nad Lužnicí) bol uskutočnený experiment drevo-betónového nosníka v spolupráci s ČVUT v Prahe, s Akadémiou vied Českej republiky a so spoločnosťou Designtec s.r.o. (Caldová a kol., 2014). Nosník bol z pevnostnej triedy dreva GL24h a drátkobetón triedy C45/55. Objemová hmotnosť dreva bola stanovená ako 512 kg/m³. Vlhkosť bola 12 %. Vnútri skúšaného nosníka boli použité termočlánky typu K. Spriahnutý stropný nosník bol vystavený normalizovanému požiaru ISO 834 z troch strán. Nosník bol namáhaný štvor-bodovou ohybovou skúškou (Caldová a kol., 2014). Skúška bola ukončená v 22. minúte normalizovaného požiaru z dôvodu zlyhania nosníka. Podrobnejší popis experimentu je uvedený v publikácii (Caldová a kol., 2014).

5.3 Numerický model na základe experimentu drevo-betónového nosníka

V tomto prípade bol použitý program na báze MKP. Na základe vyššie spomenutého experimentu spriahnutého drevo-betónového nosníka bol vytvorený numerický model. Tepelné zaťaženie bolo zadané pomocou konvekcie a radiácie podľa priebehu teplôt normalizovanej požiarnej krivky ISO 834. Tepelná vodivosť bola zhodná s hodnotami z normy a merná tepelná kapacita bola modifikovaná. Kritériom pre zastavenie optimalizačného procesu modifikácie bolo dosiahnutie rozdielu menej ako 20 °C (menej ako 10 %). V tomto modeli bola zistená poloha izotermy 300 °C a následne určená hĺbka aj rýchlosť uhoľnatenia v čase.

5.4 Výsledky a diskusia z porovnania numerických, analytických metód a experimentu drevo-betónového nosníka

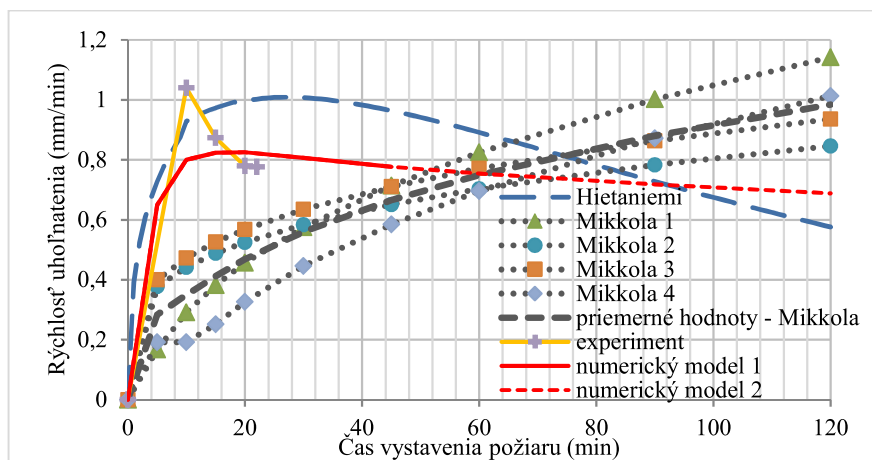
Podľa (Erchinger, 2009) má mať rýchlosť uhoľnatenia zvyšujúcu tendenciu iba do určitého času, od ktorého má mať klesajúcu tendenciu, čo má za vplyv vznik vrstvy pyrolýzy, ktorá pôsobí ako tepelná izolácia. Tomu zodpovedá priebeh rýchlosti uhoľnatenia podľa experimentu, numerického modelu a aj podľa výpočtu (Hietaniemi, 2005) V 30. minúte začína hodnota rýchlosti uhoľnatenia klesať pri výpočte podľa (Hietaniemi, 2005), v 10. minúte pri experimente a v 20. minúte pri numerickom modeli (obr. 5.1).

Výpočet podľa (Hietaniemi, 2005) je ovplyvnený hlavne tepelným tokom a obsahom kyslíka, ktoré sa menia v prvých 10 až 20 minútach. Tento výpočet má v počiatočných minútach najväčší nárast rýchlosti uhoľnatenia, ale po 90. minúte má nižšie hodnoty ako všetky ostatné metódy.

Výpočet podľa (Mikkola, 1991) nie je vhodný pre výpočet rýchlosti uhoľnatenia v akomkoľvek čase pri vystavení normalizovanej požiarnej krivke. Je to z dôvodu toho, že experimenty, na základe ktorých boli vytvorené uvedené vzorce z (Mikkola, 1991), boli uskutočnené v kónickom kalorimetri s konštantným tepelným. Z toho dôvodu je tento výpočet vhodný len pre vystavenie konštantným teplotám, alebo je použiteľný v čase približne od 45. do 90. minúty pri uvažovaní normalizovanej požiarnej krivky.

Rýchlosť uhoľnatenia pri experimente bola najvyššia v 10. minúte požiaru, ale následne došlo k výraznému poklesu rýchlosti uhoľnatenia. Vzhľadom na zlyhanie nosníka v 22. minúte nebolo možné získať výsledky pre dlhšie trvanie požiaru. Tento experiment bol využitý ako vzor skutočného prípadu drevo-betónového nosníka so skutočnými hodnotami vlhkosti a objemovej hmotnosti, ktoré boli použité pri ostatných analýzach ako vstupné hodnoty.

Na základe tohto experimentu bol vytvorený model drevo-betónového nosníka v programe na báze MKP (numerický model 1). Vzhľadom na rozmery dreveného prierezu ale pre účel porovnania s ostatnými metódami nebolo možné využiť iba tento model. Preto bol vytvorený druhý model dreveného prierezu s rovnakými tepelnými vlastnosťami a s rovnakými hodnotami tepelného zaťaženia, ale s pôsobením iba z jednej strany a tento model bol prierezu s väčšími rozmermi (140 x 160 mm), aby bolo možné sledovať rýchlosť uhoľnatenia až po 120. minútu. V prvých 45 minútach bola rovnaká rýchlosť uhoľnatenia medzi modelmi oboch prierezov, ale potom pri prvom modeli začalo byť uhoľnatenie ovplyvňované teplotou aj zo spodnej hrany nosníka a bol značný vplyv zaoblenia rohov. Nakoniec teploty dosahovali takých hodnôt, ktoré znamenajú zánik aj zuhoľnatenia. Na druhom modeli s idealizovanými rozmermi prierezu (numerický model 2) postupne klesala rýchlosť uhoľnatenia až po 120. minútu. Týmto modelom je reprezentovaná teoretická extrapolácia numerického modelu 1 bez vplyvu zaoblenia rohov.



Obr. 5.1: Rýchlosti uhoľnatenia v závislosti od času vystavenia požiaru podľa rôznych výpočtových postupov

6 Problematika trhlín v dreve pri uhoľnatení

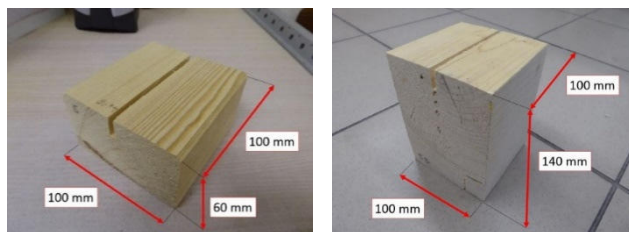
V norme (STN EN 1995-1-2, 2008) sa nachádza tabuľka s hodnotami rýchlosti uhoľnatenia, ktoré sú pri zjednodušených pravidlách uvažované ako konštanty počas celého času. Pre mäkké drevo a buk platí, že návrhová rýchlosť jednosmerného uhoľnatenia je $\beta_0 = 0,65$ mm/min pre lepené lamelové aj rastené drevo. Teoretická rýchlosť uhoľnatenia je $\beta_n = 0,7$ mm/min pre lepené lamelové drevo a $\beta_n = 0,8$ mm/min pre rastené drevo. Tento rozdiel je spôsobený tým, že v rastenom dreve sa nachádza viac trhlín ako v lepenom lamelovom dreve (Frangi, 2010) a tak dochádza k rýchlejšiemu uhoľnateniu dreva. V publikácii (Fornather a kol., 2001) je uvedené, že by mal byť zohľadnený vplyv trhlín a medzier so šírkou väčšou ako 4 mm (vo (Fornather, 2004) dokonca 2 mm), ale neexistuje návrh, ako presne zohľadniť tento účinok na uhoľnatenie dreva (Frangi a kol., 2010).

6.1 Experiment drevených prvkov s trhlinami v Trnave – tepelná analýza

6.1.1 Príprava experimentu

Pre stanovenie vplyvu odlišných rozmerov trhlín na rýchlosť uhoľnatenia bol experiment v spolupráci s MTF so sídlom v Trnave (STU v BA). Všetky vzorky sú z KVH reziva triedy C24. 30 vzoriek malo rozmery 60 x 100 x 100 mm (obr. 6.1 vľavo), 50 vzoriek malo rozmery 140 x 100 x 100 mm (obr. 6.1 vpravo).

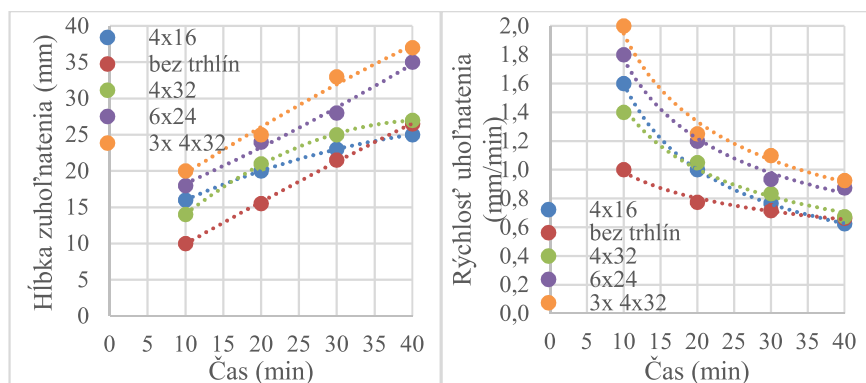
Vzorky 140x100x100 boli rozdelené do 6 skupín po 8 kusov až 9 kusov a vzorky 60x100x100 do 6 skupín po 5. Prvá skupina vzoriek má jednu trhlinu 4 x 16 mm, druhá skupina je bez trhlín, tretia skupina s trhlinou 4 x 32 mm, štvrtá skupina 6 x 24 mm, piata skupina 6 x 60 mm (pri vzorkách 60x100x100 bola nechaná táto skupina bez trhlín) a šiesta skupina má tri trhliny 4 x 32 mm. Priemerná objemová hmotnosť vzoriek 140x100x100 je 398,76 kg/m³ a vlhkosť 7,61 %. Pri vzorkách 60x100x100 je priemerná objemová hmotnosť 445,02 kg/m³ a vlhkosť 7,4 %.



Obr. 6.1: Vzorka 60x100x100 (vľavo) a vzorka 140x100x100 (vpravo)

6.1.2 Výsledky experimentu

Z vizuálneho určenia hĺbky zuhoľnatia vzoriek 60x100x100 (obr. 6.2 vľavo) bola vypočítaná rýchlosť uhoľnatia (obr. 6.2 vpravo). Pri vzorkách s bežnou počiatočnou vlhkosťou bez trhlín bola najnižšia rýchlosť uhoľnatia a najvyššia pri vzorkách s tromi trhlinami 4x32. Druhá najväčšia rýchlosť uhoľnatia bola pri vzorkách s trhlinou 6x24. Pri trhlinách 4x16 a 4x32 bola približne podobná rýchlosť uhoľnatia.



Obr. 6.2: Hĺbka zuhoľnatia (vľavo) a rýchlosť uhoľnatia (vpravo) vzoriek 60x100x100 pri bežnej počiatočnej vlhkosti

6.2 Numerická analýza skúšaných vzoriek, porovnanie s experimentom a diskusia k získaným údajom

Podľa (Tsantaridis a Östman, 1998) existuje vzťah medzi hodnotami hĺbky zuhoľnatenia získanými z kónického kalorimetra a z pece s požiarou krivkou:

$$\frac{d_{char,cone}}{d_{char,furn}} = 1,997e^{-0,019t} \quad (6.1)$$

$d_{char,cone}$ – hĺbka zuhoľnatenia z experimentu v kónickom kalorimetri (mm)

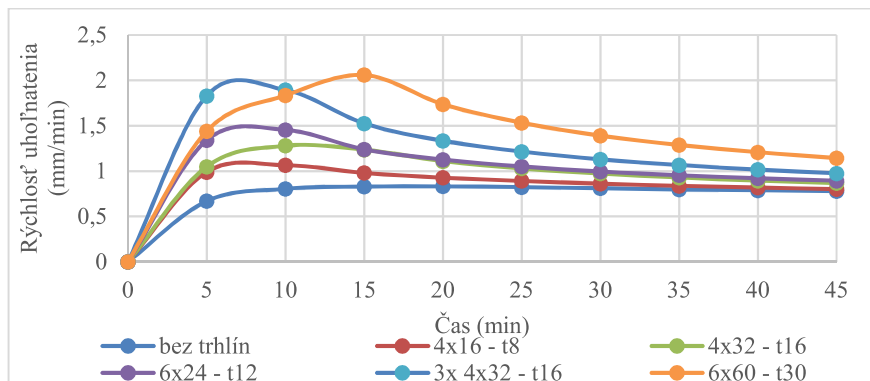
$d_{char,furn}$ – hĺbka zuhoľnatenia z experimentu v peci s normalizovaným priebehom požiarnej krivky ISO 834 (mm)

Pri numerickej analýze boli tepelné vlastnosti dreva upravené z dôvodu, že pri teplote približne 700 až 800 °C bol pozorovaný úbytok hmoty zuhoľnatej vrstvy. Hodnoty tepelnej vodivosti boli prenasobené určitým faktorom podľa (Erchinger, 2009). Pre trhlinu 6x60 musel byť tento faktor modifikovaný, lebo výsledná rýchlosť z numerickej modelov pri danom faktore bola neprimerane vysoká a bola v rozpore s experimentálnymi výsledkami.

Vzhľadom na normalizované požiadavky boli vytvorené modely s určitými hrúbkami „spriemerovaných“ vrstiev a tepelné zaťaženie bolo zadane pomocou priebehu normalizovanej požiarnej krivky.

Podľa obr. 6.3 je vplyv na zvýšenie rýchlosti uhoľnatenia 3 až 173 % pre vystavenie normalizovanej požiarnej krivke. Tento rozdiel závisí od času vystavenia požiaru, ale aj od typu a množstva trhlín.

V porovnaní s tvrdením z (Fornather, 2004), že hodnoty rýchlosti uhoľnatenia by mali byť zvýšené o 10 % iba pri trhlinách hlbších, ako je dvojnásobok hĺbky zuhoľnatenia, sú hodnoty z numerickej modelov v rozpore. Podľa hodnôt napr. v 30. minúte rozdiel pri trhline 4x16 6%, ale pri trhline 6x60 71%. Tieto rozdiely majú veľký rozptyl vzhľadom na čas.



Obr. 6.3: Vzájomné porovnanie rýchlosti uhoľnatenia v závislosti od času pre modely so „priemerovanou vrstvou“ s hrúbkou vrstvy, ktorá je rovná polovici hĺbky trhliny (pre vystavenie normalizovanej požiarnej krivke)

Pri trhlínach, ktoré nie sú veľmi hlboké (do 35 mm) a nie je ich viac ako jedna, by rýchlosť uhoľnatenia mala byť zvýšená nasledovne:

$$\beta' = \begin{cases} \beta \cdot 2,0 & \text{ak } t \leq 20 \text{ min} \\ \beta \cdot 1,3 & \text{ak } t > 20 \text{ min} \end{cases} \quad (6.2)$$

Podľa rovnakého princípu pri trhlínach, ktoré sú hlboké (viac ako 35 mm), alebo je ich viac, by rýchlosť uhoľnatenia mala byť zvýšená nasledovne:

$$\beta' = \begin{cases} \beta \cdot 2,8 & \text{ak } t \leq 20 \text{ min} \\ \beta \cdot 1,9 & \text{ak } t > 20 \text{ min} \end{cases} \quad (6.3)$$

7 Mechanická analýza

7.1 Experiment drevených prvkov za bežnej teploty

Materiálové skúšky drevených prvkov boli uskutočnené na vzorkách získaných z prebytkov po rozrezaní vzoriek 140x100x100. Experiment prebiehal v laboratóriu Katedry kovových a drevených konštrukcií na SvF STU v BA. Bolo zhotovených 10 kusov vzoriek pre namáhanie na ťah a 12 vzoriek pre namáhanie na tlak. Vzorky namáhané na ťah mali rozmery 10 x 10 x 200 mm a pre tlak 30 x 30 x 200 mm.

Experimentálne merania boli uskutočnené v súlade s normou (STN EN 408 + A1, 2013) podľa postupov pre stanovenie pevnosti a modulu pružnosti v ťahu a v tlaku v smere vlákien.

7.1.1 Určenie mechanickej odolnosti za požiaru a diskusia k výsledkom

V rámci tejto práce je uvažované s rozdelením prierezu na časti podľa pravidiel spresnených výpočtov z normy (STN EN 1995-1-2, 2008). Pre tento účel bol najskôr uvažovaný model prierezu bez trhlín s vlastnosťami vzoriek 140x100x100 a vystavením normalizovanej požiarnej krivke. Posudzovaný čas vystavenia požiaru bol 30 minút. Pevnosť prierezu v ťahu za bežnej teploty bola uvažovaná 23,502 MPa a v tlaku 30,007 MPa. Tento prierez bol rozdelený na viacero častí podľa teploty a jednotlivým častiam bola determinovaná hodnota pevnosti. V analýze boli uvažované aj ďalšie skupiny vzoriek s trhlinami. Pre zjednodušenie a zohľadnenie vplyvu trhlín na celý prierez boli ďalej uvažované modely so „spriemerovanými vrstvami“ s hrúbkou rovnou polovici hĺbky trhliny. V tab. 6.1 sú navzájom porovnané tieto modely s modelom bez trhlín.

Tab. 6.1: Výsledný zvyškový prierez a mechanické vlastnosti modelov v 30. min

	maximálna ťahová sila		d ₀ - ťah	maximálna tlaková sila		d ₀ - tlak
	(kN)	(%)		(kN)	(%)	
model bez trhlín	233,889	100%	16,13	264,568	100%	27,48
model 4x16 - t8	230,713	99%	15,98	261,023	99%	27,16
model 4x32 - t16	223,437	96%	15,73	252,476	95%	26,66
model 6x24 - t12	219,990	94%	16,55	246,432	93%	28,03
model 6x60 - t30	194,641	83%	15,43	216,557	82%	26,08
model 3x 4x32 - t16	211,071	90%	16,29	235,532	89%	27,61

Rozdiel v hodnotách rýchlosti uhoľnatenia v 30. minúte je medzi modelmi s trhlinami oproti modelu bez trhlín od 6 do 71 %. Na maximálnu ťahovú silu, ktorú

je prierez schopný preniesť, má táto zmena vplyv od 1 do 17 % a na maximálnu tlakovú silu od 1 do 18 %.

Vrstva s nulovými vlastnosťami bola vypočítaná na základe maximálnej sily, pôvodnej pevnosti za bežnej teploty a hĺbky zuhoľnatenia. Táto vrstva d_0 je v priemere rovná 16,02 mm pre ťah a 27,17 mm pre tlak podľa výsledkov numerickej analýzy (tab. 6.1). Týmito výsledkami je potvrdené tvrdenie z (Schmid a kol., 2014b) o nekonzervatívnosti použitia MÚRP s vrstvou $d_0 = 7$ mm pre všetky druhy namáhania.

8 Záver

8.1 Závery a zhrnutie z dosiahnutých výsledkov

8.1.1 Porovnanie zjednodušených metód

- Vo väčšine prípadov sú vyššie hodnoty využitia pri použití MÚRP oproti hodnotám získaným z MRV.
- Rozdiel závisí od spôsobu namáhania prvku.

8.1.2 Numerická analýza drevených prvkov s normalizovanými vlastnosťami

- Aplikácia normalizovaných tepelných vlastností je vhodná iba pri normalizovanom vystavení požiarnej krivky.
- V bežných prípadoch stavebnej praxe je malý rozdiel medzi spresnenými a zjednodušenými pravidlami pre výpočet rýchlosti uhoľnatenia.

8.1.3 Porovnanie analytických a numerických metód pre výpočet rýchlosti uhoľnatenia s výsledkami experimentu drevo-betónového nosníka

- Z výsledkov numerickej analýzy, ako aj experimentu vyplýva, že po určitom čase má rýchlosť uhoľnatenia zostupnú tendenciu, pričom do tohto času mala vzostupnú.
- Časovo závislé parametre sú zavedené vo výpočte podľa (Hietaniemi, 2005), ale nie sú v metóde podľa (Mikkola, 1991). Preto metóda podľa (Mikkola, 1991) je vhodná iba pri vystavení konštantným vysokým teplotám, alebo v prípade normalizovaného priebehu požiaru je potrebné implementovať časovo závislé parametre.
- Experimentálnymi analýzami je možné verifikovať množstvo prípadov v stavebnej praxi, ale výsledky môžu byť ovplyvnené viacerými faktormi (napr. meranie teplôt pod povrchom je ovplyvňované prestupom tepla termočlánkom, priestorom medzi termočlánkom a drevom atď.).

8.1.4 Problematika drevených prvkov s trhlínami vystavených požiaru

- Podľa výsledkov experimentov aj numerických analýz je rýchlosť uhoľnatenia drevených vzoriek bez trhlín najnižšia. Najvyššia rýchlosť uhoľnatenia je pri drevených vzorkách s hlbokou trhlínou a pri vzorkách s tromi trhlínami.
- V porovnaní s drevenými prvkami bez trhlín drevené prvky s trhlínami môžu mať hodnoty rýchlosti uhoľnatenia o 3 až 173 % vyššie v závislosti od času, rozmerov a počtu trhlín.
- Aplikácia „sprimerovaných“ modelov je vo všeobecnosti simplicitejšia numerická analýza s primeranou presnosťou výsledkov.
- Trhliny, ktoré nie sú veľmi hlboké a nie je ich viac ako jedna, by mali byť zohľadnené zvýšením rýchlosti uhoľnatenia podľa vzťahu (6.2) a trhliny, ktoré

STU

sú hlboké, alebo ich je viac, majú vplyv na rýchlosť uhoľnatenia podľa vzťahu (6.3).

8.1.5 Stanovenie mechanickej odolnosti drevených prvkov za požiaru

- Vrstva s nulovými vlastnosťami d_0 bola pri ťahovom namáhaní stanovená ako 16,02 mm a pri tlakovom namáhaní 27,17 mm, čo je v rozpore s normou (STN EN 1995-1-2, 2008), kde je $d_0 = 7$ mm pre všetky druhy namáhania.
- Postupmi podľa spresnených výpočtov bol stanovený rozdiel 1 až 17 % medzi hodnotami maximálnej ťahovej sily prierezu bez trhlín a prierezu s trhlinami. V prípade maximálnej tlakovej sily bol tento rozdiel 1 až 18 %.
- V prípade jednej trhliny menších rozmerov je vplyv trhliny teoreticky zanedbateľný pri ponechanej dostatočnej rezerve (aspoň 10 %) v posúdení prvku na účinky požiaru.
- V prípade jednej trhliny väčších rozmerov alebo väčšieho počtu trhlín je potrebné zohľadniť vplyv trhlín na rýchlosť uhoľnatenia a tým aj na reziduálny prierez a odolnosť daného dreveného prierezu.

8.2 Prínos práce pre prax

Výsledky z analýzy trhlín môžu byť prínosné pri rekonštrukciách alebo diagnostike starších konštrukcií, na ktorých časom vznikli výsušné trhliny, v nasledujúcom zmysle:

- Môžu byť použité ako návod na zistenie relevancie trhlín na výslednú mechanickú odolnosť drevenej konštrukcie na účinky požiaru.
- V prípade menších trhlín je postačujúce nechať vyššiu rezervu pri posúdení konštrukcie.
- V prípade väčších trhlín alebo väčšieho počtu trhlín je potrebné uvažovať s vplyvom týchto trhlín a to buď použitím spresnených výpočtov, alebo

použitím vyššej hodnoty rýchlosti uhoľnatenia pri výpočte reziduálneho prierezu.

8.3 Prínos práce pre vedu

Z analýzy analytických výpočtov boli porovnané výsledky a vyvodené závery:

- Z dvoch spôsobov je určený výpočet podľa (Hietanemi, 2005) ako vhodnejší pre výpočet rýchlosti uhoľnatenia v čase pri vystavení normalizovanej požiarnej krivke. V prípade výpočtu podľa (Mikkola, 1991) je vhodné použiť vzťahy iba v čase medzi 45. až 90. minútou, alebo implementovať určité časovo závislé parametre, ktoré by upravili rýchlosť uhoľnatenia v počiatku vystaveniu požiaru, alebo použiť tento výpočet v prípade konštantných teplôt.

Z analýzy trhlín pomocou experimentálnych meraní a numerických simulácií sú nasledujúce prínosy:

- Výsledky z analýzy trhlín môžu byť použité ako návod pre numerické modelovanie lokálnych trhlín alebo „spriemerovaných“ modelov.
- Uvedené zásady je možné použiť aj na iné prípady, ako napr. medzery, zapustenia oceľových plechov v spojoch alebo iné.
- Výsledky sú rozšírením určenia vplyvu trhlín a medzier, ktoré sú spomenuté v publikácii (Fornather, 2004).
- Analýza trhlín môže byť použitá na stanovenie účinku vybraných rozmerov a počtu trhlín na rýchlosť uhoľnatenia a aj na mechanickú odolnosť drevených konštrukcií s trhlinami, ktoré sú vystavené požiaru.

8.4 Odporúčania pre ďalší výskum

Pre ďalší výskum vplyvu trhlín na mechanickú odolnosť drevených konštrukcií za požiaru by boli užitočné nasledujúce postupy:

- Použitie väčšieho počtu vzoriek s trhlinami vo všeobecnosti.

- Použitie vzoriek so skutočnými trhlinami.
- Experiment s drevenými prvkami s trhlinami, ktoré budú skúšané v peci s normalizovanou požiarnou krivkou ISO 834 a namáhané rôznymi spôsobmi mechanického zaťaženia.
- Zistenie najčastejších rozmerov a počtu trhlín v skutočných konštrukciách, ktoré sú staršie. Výskum zameraný na dané prípady vybraných konštrukcií.
- Zistenie najčastejších rozmerov a počtu trhlín v skutočných konštrukciách, ktoré sú nové a ich trhliny sú v rámci povolených kritérií podľa (STN 49 1531/Z1, 2006). Zistenie relevantnosti zohľadnenia vplyvu trhlín z hľadiska štatistiky pri nových konštrukciách.

9 Publikácie autorky

KAMENICKÁ, Zuzana - BOTLÓ, Michal. Mechanical resistance of timber structures in fire. In *Interdisciplinarity in theory and practice [elektronický zdroj]*. No. 11 (2016), online, s. 85-90. ISSN 2344-2409.

KAMENICKÁ, Zuzana - SANDANUS, Jaroslav. Comparison of simplified and advanced design methods for determining mechanical resistance of timber structures exposed to fire. In *International Wood Products Journal*. Vol. 8, no. 2 (2017), s. 88-93. ISSN 2042-6445. V databáze: SCOPUS ; DOI: <https://doi.org/10.1080/20426445.2017.1335478>.

BALÁŽ, Ivan - KAMENICKÁ, Zuzana - KOLEKOVÁ, Yvonna. Timber covered bridges on the Slovak territory. In *M2D2015 [elektronický zdroj] : proceedings of the 6th International Conference on Mechanics and Materials in Design. Ponta Delgada, Portugal, 26. - 30. 7. 2015*. Porto : FEUP-INEGI, 2015, USB kľúč, s. 2373-2388. ISBN 978-989-98832-3-9. V databáze: WOS: 000378595500422.

KAMENICKÁ, Zuzana. Timber structures and their fire resistance. In *MMK 2015. 6. Mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky [elektronický zdroj] : sborník příspěvků z mezinárodní vědecké konference, 14. - 18. 12. 2015, Hradec Králové, Česká republika*. 1. vyd. Hradec Králové : Magnanimitas, 2015, online, s. 2679-2687. ISBN 978-80-87952-12-2.

KAMENICKÁ, Zuzana. Návrh drevených konštrukcií na účinky požiaru. In *Juniorstav 2016 [elektronický zdroj] : 18. odborná konference doktorského studia. Brno, ČR, 28. 1. 2016*. 1. vyd. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2016, CD-ROM, [8] s. ISBN 978-80-214-5311-1.

KAMENICKÁ, Zuzana. Analytické a numerické modely pre drevené konštrukcie vystavené požiaru. In *Juniorstav 2017 [elektronický zdroj] : 19. odborná konference doktorského studia. Brno, ČR, 26. 1. 2017 = Juniorstav 2017, 19th International Conference of PhD Students*. 1. vyd. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2017, USB kľúč, [8] s. ISBN 978-80-214-5473-6.

KAMENICKÁ, Zuzana. Analýza rýchlosti uhoľnatenia drevených prvkov s trhlinami. In *Juniorstav 2018 [elektronický zdroj] : 20. odborná konference doktorského studia. Brno, ČR, 25. 1. 2018 = Juniorstav 2018, 20th International Conference of PhD Students*. 1. vyd. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2018, USB kľúč, [8] s. ISBN 978-80-86433-69-1.

BALÁŽ, Ivan - KAMENICKÁ, Zuzana - KOLEKOVÁ, Yvonna. Drevené kryté mosty na Slovensku. In *Zborník prednášok zo 40. aktívu pracovníkov odboru oceľových konštrukcií : Oššadnica, SR, 22. - 23. 10. 2015*. 1. vyd. Kysucké Nové Mesto : Miroslav Gibala - Reklamný servis, 2015, S. 29-34. ISBN 978-80-89619-01-6.

BALÁŽ, Ivan - KAMENICKÁ, Zuzana - KOLEKOVÁ, Yvonna. Historical Timber Bottom Bridge in Gelnica over Hnilec River. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings [elektronický zdroj] : proceedings of 13th International Conference. Bratislava, Slovakia, 15.*

- 16. 10. 2015. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2015, CD-ROM, [4] s. ISBN 978-80-227-4463-8.

BALÁŽ, Ivan - KAMENICKÁ, Zuzana - KOLEKOVÁ, Yvonna. Slovenské historické kryté drevené mosty. In *Statika stavieb 2016 : zborník príspevkov z 21. konferencie. Piešťany, SR, 10. - 11. 3. 2016*. 1. vyd. Bratislava : Spolok statikov Slovenska, 2016, S. 250-257. ISBN 978-80-89842-00-1.

BALÁŽ, Ivan - KAMENICKÁ, Zuzana - KOLEKOVÁ, Yvonna . Historical Covered Timber Bridge in Gelnica Near Station. In *Trends in Statics and Dynamics of Construction II [elektronický zdroj] : selected, peer reviewed papers from the 13th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings, Bratislava, SR, 15. - 16. 10. 2015*. CD-ROM, s. 44-51. ISSN 1660-9336.

FÁBRY, Michal - KAMENICKÁ, Zuzana. Prepared measurements on the monitoring of the bridge in the Slovakia. In *ISec 2015 - Interdisciplinary Scientific eConference [elektronický zdroj] : proceedings of the International virtual conference. Bratislava, SR, 20. - 24. 7. 2015*. Bratislava : NEXSYS, 2015, online, [8] s. ISBN 978-80-972051-0-2.

KAMENICKÁ, Zuzana. Navrhovanie drevených konštrukcií na požiarnu odolnosť. In *Advances in architectural, civil and environmental engineering [elektronický zdroj] : 25rd Annual PhD Student Conference on Architecture and Construction Engineering, Building Materials, Structural Engineering, Water and Environmental Engineering, Transportation Engineering, Surveying, Geodesy, and Applied Mathematics. Bratislava, SR, 28. 10. 2015*. 1. vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2015, CD-ROM, s. 447-453. ISBN 978-80-227-4514-7.

KAMENICKÁ, Zuzana - SANDANUS, Jaroslav. Simplified and advanced design methods for mechanical resistance of timber structures. In *Wood & Fire Safety [elektronický zdroj] : proceedings of the 8th International Conference. The High Tatras, Štrbské Pleso, 8. - 12. May*

2016 = Wood and Fire Safety 2016. 1. vyd. Žilina : EDIS, 2016, USB kľúč, s. 129-136. ISBN 978-80-554-1201-6.

KAMENICKÁ, Zuzana - BOTLÓ, Michal. Timber Structures Exposed to Fire. In *ESaT 2016 [elektronický zdroj] : proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies. Tatranské Matliare, Slovak Republic, 29th of June - 1st of July 2016*. Košice : Technical University of Košice, Faculty of Civil Engineering, 2016, CD-ROM, [4] s. ISBN 978-80-553-2564-4.

KAMENICKÁ, Zuzana. Pôsobenie požiaru na drevené konštrukcie. In *XXXXI. aktív pracovníkov odboru oceľových konštrukcií. Stav a perspektívy rozvoja : zborník prednášok. Štrbské Pleso, SR, 19. - 21. 10. 2016*. 1. vyd. Košice : Technická univerzita Košice, Stavebná fakulta, 2016, S. 105-112. ISBN 978-80-553-2612-2.

KAMENICKÁ, Zuzana. Spresnené výpočtové metódy na určenie mechanickej odolnosti drevených prvkov za požiaru. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 26th Annual PhD Student Conference on Architecture and Construction Engineering, Building Materials, Structural Engineering, Water and Environmental Engineering, Transportation Engineering, Surveying, Geodesy, and Applied Mathematics. 26. October 2016, Bratislava*. 1. vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2016, CD-ROM, s. 341-346. ISBN 978-80-227-4645-8.

KAMENICKÁ, Zuzana - BOTLÓ, Michal. Resistance of timber structures exposed to fire. In *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II : proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies. High Tatras Mountains, Tatranské Matliare, Slovak Republic, 29 June - 1 July 2016*. 1. vyd. London : Taylor & Francis Group, 2017, S. 135-140. ISBN 978-1-138-03224-8. V databáze: SCOPUS.

KAMENICKÁ, Zuzana - SANDANUS, Jaroslav. Stanovenie rýchlosti a hĺbky zuhoľnatenia drevených prvkov pomocou metód podľa Eurokódu 5, časť 2. In *Advances in Fire and Safety*

Engineering 2017 [elektronický zdroj] : recenzovaný zborník pôvodných vedeckých prác zo VI. ročníka medzinárodnej vedeckej konferencie. Trnava, 19. - 20. október 2017. 1. vyd. Trnava : STU v Bratislave, Materiálovotechnická fakulta so sídlom v Trnave, Alumni Press, 2017, CD-ROM, s. 232-239. ISBN 978-80-8096-245-6.

KAMENICKÁ, Zuzana. Vplyv trhlín na rýchlosť uhoľnatenia drevených prvkov. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 27th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Geodesy and Cartography, Landscaping, Building Technology, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Theory and Environmental Technology of Buildings, Water Resources Engineering. 25. October 2017, Bratislava, Slovakia. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2017, CD-ROM, s. 308-314. ISBN 978-80-227-4751-6.*

KAMENICKÁ, Zuzana. Výpočet rýchlosti uhoľnatenia drevených prvkov. In *Oceľ, drevo, betón a sklo v konštrukciách : zborník príspevkov z XLII. celoštátneho aktívu pracovníkov odboru oceľových konštrukcií so zahraničnou účasťou pri príležitosti 75. výročia Katedry kovových a drevených konštrukcií SvF STU v Bratislave. Kočovce, SR, 4. - 6. 10. 2017. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2017, S. 101-106. ISBN 978-80-227-4734-9.*

KAMENICKÁ, Zuzana - SANDANUS, Jaroslav. Charring rate of timber structures in fire. In *INTERFACES - architecture, engineering, science - IASS 2017 [elektronický zdroj] : proceedings of the IASS Annual Symposium. September 25th-28th, 2017, Hamburg, Germany. Hamburg : HafenCity University, 2017, USB kľúč, [10] s.*

9.1 Publikácie v procese recenzovania

KAMENICKÁ, Zuzana - SANDANUS, Jaroslav - BLESÁK, Lukáš - CÁBOVÁ, Kamila - WALD, František. Methods for determining the charring rate of timber and their mutual comparison. In *Wood Research*

KAMENICKÁ, Zuzana - SANDANUS, Jaroslav - BLESÁK, Lukáš - CÁBOVÁ, Kamila - WALD, František. Comparison of Analytical and Numerical Results for the Charring Rate of the Timber-Concrete Beam. In *International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research*

KAMENICKÁ, Zuzana - SANDANUS, Jaroslav – KLAS, Tomáš – RANTUCH, Peter – MARTINKA, Jozef – BALOG, Karol. Experimentálna a numerická analýza vplyvu trhlín na uhoľňatenie drevených prvkov. In *Czech Journal of Civil Engineering*

10 Použitá literatúra

STN EN 408 + A1: Drevené konštrukcie. Konštrukčné drevo a lepené lamelové drevo. Stanovenie niektorých fyzikálnych a mechanických vlastností, 2013

STN EN 1995-1-2: Eurokód 5: Navrhovanie drevených konštrukcií. Časť 1-2: Všeobecné pravidlá. Navrhovanie konštrukcií na účinky požiaru, 2008

CALDOVÁ, E. - BLESÁK, L. - WALD, F. - KLOIBER, M. – URUSHADZE, S. – VYMLÁTIL, P.: *Behaviour of Timber and Steel Fibre Reinforced Concrete Composite Constructions with Screwed Connections*. Wood research [online]. 2014, 59(4), 639-660 [cit. 2016-12-07]. Dostupné z: <http://www.centrumdp.sk/wr/201404/11.pdf>

ERCHINGER C.-D.: Zum Verhalten von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen im Brandfall [online], Zürich, 2009 [cit. 2016-12-08], Dostupné z: <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:2352/eth-2352-01.pdf>, PhD. Thesis, Institut für Baustatik und Konstruktion Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

FORNATHER, J. – HOCHREINER, G. – LUGGIN, W. F.: Brennbarkeit und Brandverhalten von Holz, Holzwerkstoffen und Holzkonstruktionen: Zusammenfassung und Erkenntnisse für die Bemessungspraxis ; ein Forschungsprojekt des Fachverbandes der Holzindustrie Österreichs. 2. Aufl. Wien: proHolz Austria, 2004. ISBN 3902320036

FORNATHER, J. - BERGMEISTER, K. - HOCHREINER, G.: *Versuchsbericht – Kleinbrandversuchsreihe 2 Teil 1 (KBV 2/1) – Versuche mit Rissen*. Universität für Bodenkultur, Institut für konstruktiven Ingenieurbau.Vienna, 2001

FRANGI, A. – KÖNIG, J. a kol.. *Fire safety in timber buildings: Technical guideline for Europe* [online]. 2010 [cit. 2015-09-09]. Dostupné z: http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/Fire_Timber_Ch_5-7.pdf

HIETANIEMI, J.: *A Probabilistic Approach to Wood Charring Rate* [online]. In: Finland: VTT Information Service, 2005 [cit. 2016-12-06]. ISBN 951-38-6583-5. ISSN 1459-7683. Dostupné z: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>

MIKKOLA, E.: *Charring Of Wood Based Materials. Fire Safety Science*. 1991, **3**, 547-556. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.3-547. ISSN 18174299. Dostupné tiež z: <http://www.iafss.org/publications/fss/3/547>

TSANTARIDIS, L. D. – ÖSTMAN, B. A.-L.: *Charring of Protected Wood Studs*. Fire and Materials: Fire Mater [online]. 1998, **22**, 55-60 [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/%28SICI%291099-1018%28199803%2F04%2922%3A2%3C55%3A%3AAID-FAM635%3E3.0.CO%3B2-T>