

# Analysis of Carbonized Layer of Wood Beams with Different Geometric Cross-Section Shape

## Analýza zuhoľnatenej vrstvy drevených nosníkov s rôznym geometrickým tvarom prierezu

Dominik Špilák<sup>1</sup>, Ľudmila Tereňová<sup>1</sup>, Katarína Dúbravská<sup>1\*</sup>, Andrea Majlingová<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technical University in Zvolen, T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen, Slovak Republic; [xspilakd@is.tuzvo.sk](mailto:xspilakd@is.tuzvo.sk), [ludmila.terenova@tuzvo.sk](mailto:ludmila.terenova@tuzvo.sk), [katarina.dubravska@tuzvo.sk](mailto:katarina.dubravska@tuzvo.sk), [andrea.majlingova@tuzvo.sk](mailto:andrea.majlingova@tuzvo.sk)

\* Corresponding author: [katarina.dubravska@tuzvo.sk](mailto:katarina.dubravska@tuzvo.sk)

*Original scientific paper*

*Received: December 7, 2018; Accepted: December 15, 2018; Published: December 31, 2018*

### Abstract

The design of wooden load-bearing elements for the effects of fire is a necessity when designing timber structures. Therefore, ongoing research focusing on the behavior of wooden elements in fire conditions in this area is still important. The paper focuses on the study of a carbonized layer of wood beams differing in geometric cross-section shapes: square cross-section, square cross-section with cut edges and round cross section (log). The carbonized layer was evaluated by the calculation according to STN EN 1995-1-2 [1] and at the same time, by a medium-scale test, in which the samples were unilaterally loaded with radiant heat source. The obtained results were supplemented by results of computer simulation in Ansys 18.1 program, the result of which is the graphical depiction of the degree of wood beams carbonization in time of 30 min. The depth of the carbonized layer formed during the experiment corresponded to the calculated value for the square cross-section and the square cross-section with the cut edges. In the experiment, the round cross-section showed the highest depth of carbonization, which was also confirmed by the results of computer simulation. The results showed that thermal degradation and carbonization proceeds faster in the beams of the log. This must be considered in their static design for the effects of fire.

**Keywords:** wood beam, radiant heat source, medium-scale test, carbonized layer, computer simulation

### 1 Introduction

When wood is burning, there occurs the thermal degradation of bindings of its basic components and the change of their chemical composition leads to the formation of many products [2]. According to Kučera et al. [3], Osvald [4], Leško and Lopušniak [5], Vavrušková and Lokaj [6], Kuklík [7], a carbonized layer is formed on the surface of the wood. This layer prevents air from entering the internal parts of the element cross-section, diminishes the burning and has good thermal insulation properties. Štefko et al. [8], Vavrušková and Lokaj [6], Koželouh [9], Blass

### 1 Úvod

Pri horení dreva dochádza k termickému rozkladu väzieb jeho základných komponentov a zmene ich chemického zloženia za vzniku mnohých produktov [2]. Podľa Kučera a kol. [3], Osvald [4], Leško a Lopušniak [5], Vavrušková a Lokaj [6], Kuklík [7], pri tepelnom namáhaní sa na povrchu dreva vytvára zuhoľnatená vrstva. Táto vrstva bráni prístupu vzduchu do vnútorných častí prierezu prvku, tlmí horenie a má dobré tepelnoizolačné vlastnosti. Štefko a kol. [8], Vavrušková a Lokaj [6], Koželouh [9], Blass [12] uvádzajú, že tepelná vodivosť zuhoľnatenej vrstvy je asi

[12] indicate that the thermal conductivity of the carbonized layer is about 1/6 of the thermal conductivity of the wood. As a result, the residual cross-section temperature of the element remains unchanged at small distances [7]. The structure of a wood cross-section, which is exposed to fire (see Fig. 1), also briefly described by Vavrušková and Lokaj [6]:

- Carbonized layer - the inner surface of the carbonized layer has a temperature of about 300 °C,

- Layer of wood affected by the temperature - a part of the layer with a temperature above 200 °C is called the pyrolysis layer because it involves intensive thermal decomposition associated with gas release and is characterized by color change and weight loss,

- Residual cross-section - virtually unaffected by the temperature that is diminishing in time with the progressive fire.

According to Kučera et al. [3], König [11], Osvald [4], the position of the carbonizing range corresponds to the isotherm position of 300 °C.

1/6 z tepelnej vodivosti dreva. V dôsledku toho zostáva teplota zostatkového prierezu prvku už v malých vzdialenostiach nezmenená [7]. Skladbu dreveného prierezu, ktorý je vystavený účinkom požiaru (viď Obr. 1), stručne popísali aj Vavrušková a Lokaj [6]:

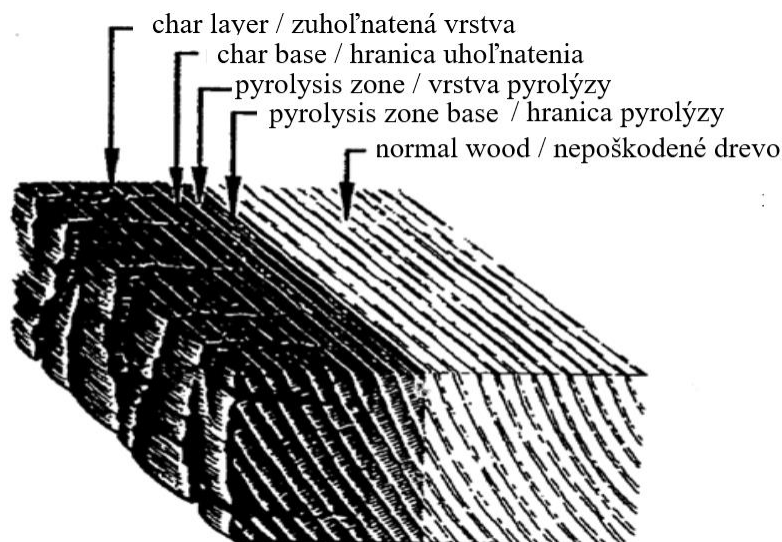
- zuhoľnatená vrstva – vnútorný povrch zuhoľnatej vrstvy má teplotu okolo 300 °C,

- vrstva dreva ovplyvneného teplotou – časť tejto vrstvy s teplotou nad 200 °C sa nazýva vrstva pyrolýzy, pretože v nej dochádza k intenzívnemu tepelnému rozkladu, spojenému s uvoľňovaním plynov a vyznačujúcim sa zmenou farby a stratou hmotnosti,

- zostatkový prierez – prakticky neovplyvnený teplotou, ktorý sa v čase s postupujúcim požiarom znižuje.

Podľa Kučeru a kol. [3], Königa [11], Osvalda [4] poloha hranice zuhoľnatenia zodpovedá polohe izotermy 300 °C.

Z vyššie uvedeného vyplýva, že na povrchu drevenej konštrukcie nechránenej pred účinkami požiaru dochádza k tvorbe zuhoľnatej vrstvy. Avšak už v malých vzdialenostiach od povrchu exponovanej strany



**Fig. 1** Wood cross-section during fire exposure [6]  
**Obr. 1** Drevený prierez vystavený účinkom požiaru [6]

It follows from the above that the surface of the wooden structure, which is not protected from the effects of fire, produces a carbonized layer. However, the temperatures are unchanged at a small distance from the surface of the exposed side. According to Buchanan

sú teploty nezmenené. Drevené konštrukcie si podľa Buchanana [12] vo vnútri svojho prierezu zachovávajú svoje mechanické vlastnosti bez podstatných zmien a požiaru odolnosť konštrukčného prvku je možné určiť na základe

[12], the timber structures maintain their mechanical properties within their cross-section without any significant changes, and the fire resistance of the structural element can be determined on the basis of the residual cross-section. Therefore, it is necessary to dimension the structure in order to maintain its load capacity even in case of fire. The rules for the design of structures made of wood or wood-based materials for fire effects are summarized in STN EN 1995-1-2 [1]. It is possible to design a wooden structure for the effects of fire, according to Kuklík [7], Tereňová [13] in several ways, but in this case the most efficient method is the effective cross-section method, i. e. by reducing the cross-section exposed to the fire.

The aim of the medium-scale test was to determine whether the geometric shape of the cross-section of wood horizontal beams exposed to the radiant heat source for 30 minutes affected the depth of the carbonized layer, and whether the carbonized layer found would correspond to the carbonized layer calculated by the effective cross-section method according to STN EN 1995-1-2 [1].

Another objective was to simulate the formation of the carbonized layer on the given samples under the same conditions of thermal loading using the Ansys 18.1 program and to compare the results obtained.

## 2 Methodology

### Medium-scale test method

The test samples, represented by horizontal beams with different geometric cross-sectional shape, have undergone experiments. Based on the results obtained through the medium-scale test, we determined the depth of the carbonized layer formed on the tested samples. The samples were loaded with a radiant heat source for 30 minutes using a ceramic radiation panel. The heat source characterizes the following data: dimensions of the radiant surface - 480 x 280 mm, maximum power of radiant surface - 50.5 KW / m<sup>2</sup>, radiant surface temperature - 935 °C. We placed the heat source 30 cm away from the sample to produce as much radiation to sample as possible. The device was connected to the gas

zostatkového prierezu. Preto je potrebné konštrukciu nadimenzovať tak, aby si zachovala nosnosť aj v prípade požiaru. Pravidlá pre návrh konštrukcií vyhotovených z dreva alebo z materiálov na báze dreva na účinky požiaru sú zhrnuté v STN EN 1995-1-2 [1]. Navrhnuť drevenú konštrukciu na účinky požiaru je možné podľa Kuklíka [7], Tereňovej [13] viacerými spôsobmi, avšak v tomto prípade je najvhodnejšia metóda účinného prierezu, t.j. redukciiu prierezu namáhaného požiarom.

Cieľom vykonaného strednorozmerového testu bolo zistiť, či geometrický tvar prierezu vzoriek drevených vodorovných nosníkov, vystavených sálavému zdroju tepla po dobu 30 minút, má vplyv na hĺbku zuhoľnatenej vrstvy a či zistená zuhoľnatená vrstva bude zodpovedať zuhoľnatenej vrstve vypočítanej metódou účinného prierezu podľa STN EN 1995-1-2 [1]. Ďalším cieľom bolo za rovnakých podmienok tepelného zaťaženia nasimulovať vznik zuhoľnatenej vrstvy na daných vzorkách pomocou programu Ansys 18.1. a získané výsledky navzájom porovnať.

## 2 Metodika

### Metodika strednorozmerového testu

Experimentu sme podrobili skúšobné vzorky, ktoré predstavovali vodorovné nosníky s rôznym geometrickým tvarom prierezu. Prostredníctvom výsledkov získaných strednorozmerovým testom sme zisťovali hĺbku zuhoľnatenej vrstvy, ktorá sa vytvorila na skúšobných vzorkách. Vzorky boli zaťažované sálavým zdrojom tepla po dobu 30 min prostredníctvom keramického radiačného panelu. Tepelný zdroj charakterizujú nasledovné údaje: rozmer radiačnej plochy – 480 x 280 mm, max. výkon radiačnej plochy – 50,5 KW/m<sup>2</sup>, dosahovaná teplota radiačnej plochy – 935 °C. Zdroj tepla sme umiestnili 30 cm od vzorky tak, aby na vzorku pôsobilo čo najviac žiarenia. Zariadenie sme zapojili na plyn cez prietokomer tak, aby sme mohli redukovať prietok a aby bol pri každej vzorke rovnaký. Prietok sme nastavili na 13 l/h. Tento prietok bol konštantný pri každom meraní, aby sme dosiahli rovnaké teploty sálavého tepla.

through the flowmeter so that we can reduce the flow rate and to assure to be the same for each sample. We set the flow rate to 13 l / h. This flow rate was constant for each measurement to achieve the same radiant heat temperatures.

The fire loading tests have undergone the following prisms of spruce wood:

- 3 samples of square cross-section with dimensions of 60 x 60 mm,
- 3 samples of square cross-section with cut edges with dimensions of 60 x 60 mm and
- 3 samples of a round cross-section with diameter of 60 mm.

We chose the dimensions in a 1:4 scale compared to the real 240 mm dimension, which is the standard diameter of the load bearing elements with round cross-section in practice. The sample length was of 1.2 m. The test samples are shown in Fig. 2. The overall diagram of the device for performing the medium-scale test is shown in Fig. 3.

Zaťažovým skúškam sme podrobili nasledovné hranoly zo smrekového dreva:

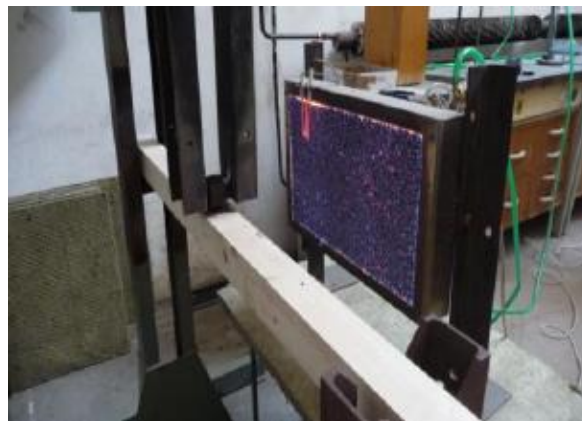
- 3 vzorky štvorcového prierezu 60 x 60 mm,
- 3 vzorky štvorcového prierezu so zrezanými hranami 60 x 60 mm a
- 3 vzorky okrúhleho prierezu priemeru 60 mm.

Dané rozmery sme zvolili zmenšené v pomere 1 : 4 v porovnaní so skutočným rozmerom 240 mm, ktorý je štandardným priemerom nosných prvkov okrúhleho prierezu v praxi. Dĺžka vzoriek bola 1,2 m. Skúšobné vzorky sú znázornené na Obr. 2. Celková schéma zariadenia pre uskutočnenie strednorozmerového testu je zobrazená na Obr. 3.



**Fig. 3** Test samples

**Obr. 2** Skúšobné vzorky



**Fig. 2** Devices arrangement

**Obr. 3** Usporiadanie zariadení

### Effective cross-section method

The effective cross-section should be calculated by reducing the original cross-section by the original cross-section by the effective depth of carbonized layer ( $d_{ef}$ ), see Fig. 4:

$$d_{ef} = d_{char} + k_0 \cdot d_0 \quad (1)$$

Where:

$d_{char}$  Designed depth of carbonization for unidirectional carbonization,

$k_0$  Coefficient which modifies the thickness of the zero strength layer  $d_0$  depending on the duration of the fire ( $k_0 = 1.0$ , according to Table 4.1 of EN 1995-1-2 [1] for  $t \geq 20$  min.),

$d_0$  7 mm (for a fire lasting  $\geq 20$  min:  $d_0 = 7$  mm, according to EN 1995-1-2 [15]).

### Metóda účinného prierezu

Účinný prierez sa má vypočítať redukciou pôvodného prierezu o účinnú hĺbku zuhoľnatenia  $d_{ef}$  (vid'. Obr. 4):

Kde:

$d_{char}$  návrhová hĺbka zuhoľnatenia pre jednosmerné uhoľnatenie,

$k_0$  súčiniteľ, ktorým sa upravuje hrúbka vrstvy nulovej pevnosti  $d_0$  v závislosti na dobe trvania požiaru ( $k_0 = 1,0$  podľa tab. 4.1 STN EN 1995-1-2 [1] pre  $t \geq 20$  min.),

$d_0$  7 mm (pri požiaru trvajúcim  $\geq 20$  min. je  $d_0 = 7$  mm podľa STN EN 1995-1-2 [15]).

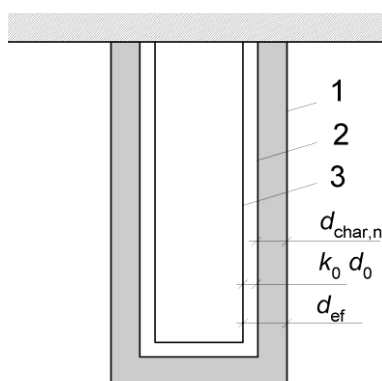


Fig. 4 Definition of effective cross-section [1]

Obr. 4 Definícia efektívneho prierezu [1]

### Carbonized layer depth calculation

Carbonization rate for unidirectional carbonization according to STN EN 1995-1-2 [1] should be taken as constant in time. The design depth of carbonization ( $d_{char,0}$ ) is calculated according to:

$$d_{char,0} = \beta_0 \cdot t \quad (2)$$

Where:

$\beta_0$  Design rate of unidirectional carbonization when exposed to the normalized fire (according to the Tab.1)

$t$  Fire exposure time.

### Výpočet hĺbky zuhoľnatej vrstvy

Rýchlosť uhoľnatenia pre jednosmerné uhoľnatenie v zmysle STN EN 1995-1-2 [1] sa má brať ako konštantná v čase. Návrhová hĺbka zuhoľnatenia sa vypočíta podľa vzťahu:

Kde:

$\beta_0$  návrhová rýchlosť jednosmerného uhoľnatenia pri vystavení normalizovanému požiaru (Tab. 1),

$t$  čas vystavenia požiaru.

**Tab. 1** Design rates of carbonization ( $\beta_0$ ) of wood, laminated veneer lumber (LVL), wood panels, and wood-based panels [1]

**Tab. 1** Návrhové rýchlosti uhoľnatenia ( $\beta_0$ ) dreva, vrstveného dýhového dreva (LVL), drevených dosiek a dosiek na báze dreva [1]

	$\beta_0$ (mm/min)
<b>a) Softwood and European beech / Mäkké drevo a buk</b>	
Glued laminated wood with a characteristic bulk density $\geq 290 \text{ kg / m}^3$ Lepené lamelové drevo s charakteristickou objemovou hmotnosťou $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65
Raw wood with a characteristic bulk density $\geq 290 \text{ kg / m}^3$ Rastené drevo s charakteristickou objemovou hmotnosťou $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65
<b>b) Hardwood / Tvrdé drevo</b>	
Raw or glued laminated wood with characteristic bulk density of $290 \text{ kg / m}^3$ Rastené alebo lepené lamelové drevo s charakteristickou objemovou hmotnosťou $290 \text{ kg/m}^3$	0,65
Raw or glued laminated wood with characteristic bulk density $\geq 450 \text{ kg / m}^3$ Rastené alebo lepené lamelové drevo s charakteristickou objemovou hmotnosťou $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50
<b>c) Laminated veneer lumber (LVL) / Vrstvené dýhové drevo</b>	
with characteristic bulk density $\geq 480 \text{ kg / m}^3$ s charakteristickou objemovou hmotnosťou $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65
<b>d) Panels / Dosky</b>	
Wooden panels Drevené dosky	0,9 <sup>a</sup>
Plywood Preglejky	1,0 <sup>a</sup>
Wood-based panels other than plywood Dosky na báze dreva iné ako preglejky	0,9 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> The values are valid for the characteristic bulk density of  $450 \text{ kg / m}^3$  and a thickness of 20 mm.  
a Hodnoty platia pri charakteristickej objemovej hmotnosti  $450 \text{ kg/m}^3$  a hrúbke 20 mm.

For other characteristic bulk densities ( $\rho_k$ ) and panel thicknesses ( $h_p$ ) less than 20 mm, which are introduced in Tab. 1, the rate of carbonization must be calculated according to:

Pri iných charakteristických objemových hmotnostiach  $\rho_k$  a hrúbkach dosiek  $h_p$  menších ako 20 mm, ktoré sú uvedené v tab. 1, sa má rýchlosť uhoľnatenia vypočítať podľa vzťahu:

$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_0 \cdot k_\rho \cdot k_h \quad (3)$$

$$k_\rho = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}}, \quad k_h = \sqrt{\frac{20}{h_p}} \quad (4)$$

Where:

$\beta_0$  Design rate of carbonization according to Tab. 1,

$\rho_k$  Characteristic bulk density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),

$h_p$  Panel thickness (mm).

### Simulation methodology

When studying the behavior of wood beams exposed to thermal loading, the finite element model in Ansys 18.1 program were used. The change in material properties was set in the simulation according to the requirements of STN EN 1995-1-2 [1]. Thermal loading consisted of two components: radiant heat, the source of which was the radiation panel and the flame that was formed after ignition of the released gases generated by thermal degradation of the wood beam. The radiation panel was set to a power of  $50.5 \text{ KW} / \text{m}^2$ , corresponding to a temperature of  $935^\circ \text{C}$ . The total emissivity was set to value of 0.9. As a consequence of the enclosed room, only natural air flow resulted from the difference in temperature of the heated gases and surroundings. The heat transfer between the wood beam and the air varies depending on the temperature. The aim of the computer simulation was to reproduce the conditions of the medium-scale tests and to compare the obtained results with the results of the computer simulation.

### Geometry and discretization

Each simulation consisted of a transient thermal analysis. In the simulation, the following types of elements, available in Ansys 18.1: SOLID90 and SURF152, were used as thermal elements used to simulate heat transfer. SOLID90 is a 20 node thermal element providing conduction, while the SURF152 is a 4 node element providing [18]. SURF152 covers SOLID90 to simulate convection and radiation from the area of heat loading. The beam model was meshed by an Ansys program to a number of approximately 10,000 nodes.

Kde:

$\beta_0$  návrhová rýchlosť uhoľnatenia podľa Tab. 1,

$\rho_k$  je charakteristická objemová hmotnosť  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,

$h_p$  je hrúbka dosky v mm.

### Metodika simulácie

Pri skúmaní správania sa drevených nosníkov vystavených tepelnému namáhaniu bol využitý model konečných prvkov s použitím programu Ansys 18.1. Zmena materiálových vlastností bola v simulácii nastavená v zmysle požiadaviek STN EN 1995-1-2 [1]. Tepelné namáhanie pozostávalo z dvoch zložiek, sálavého tepla, ktorého zdrojom bol radiačný panel a plameňa, ktorý vznikol po zapálení uvoľnených plynov vzniknutých pri tepelnej degradácii dreveného nosníka. Radiačný panel bol nastavený na výkon  $50,5 \text{ KW}/\text{m}^2$ , čomu zodpovedala teplota  $935^\circ \text{C}$ . Celková emisivita bola nastavená na hodnotu 0,9. V dôsledku uzavretej miestnosti dochádzalo len k prirodzenému prúdeniu vzduchu dôsledkom rozdielnej teploty ohriatych plynov a okolia. Prestup tepla medzi dreveným nosníkom a vzduchom sa v závislosti od teploty menil. Cieľom počítačovej simulácie bolo napodobniť podmienky strednorozmerových testov a porovnať z nich získané výsledky s výsledkami z počítačovej simulácie.

### Geometria a diskretizácia

Každá simulácia pozostávala z dynamickej termickej analýzy. Pri simulácii boli použité nasledovné typy elementov, dostupné v programe Ansys 18.1: SOLID90 a SURF152, ako termálne elementy slúžiace na simuláciu prenosu tepla. SOLID90 je 20 uzlový termálny element zabezpečujúci kondukciu, zatiaľ čo SURF152 je 4 uzlový element zabezpečujúci simuláciu kondukcie, konvekcie a radiácie (ANSYS Mechanical APDL Thermal Analysis Guide). SURF152 pokrýva SOLID90 pre simuláciu konvekcie a radiácie z priestoru tepelného namáhania. Model nosníka bol nasiet'ovaný programom Ansys na počet približne 10000 uzlov.

### 3 Results

#### Carbonized layer calculation

Thermal stability of wood is affected by the density and chemical composition of wood. The density of tested samples was in range of  $\rho = 380 \pm 8,4 \text{ kg/m}^3$ .

For this wood density value we calculated the design rates of carbonization  $\beta_{0, \rho, t}$  using the equation (3) and further the depth of carbonization layer  $d_{\text{char},0}$ :

$\beta_{0, \rho, t} = 0,40 \text{ mm/min}$ ;  $d_{\text{char},0} = 12 \text{ mm}$ , ( $\beta_0 = 0,65$  z Tab. 1).

Based on the results, we can state that the depth of the carbonized layer should be less than 12 mm.

#### Medium-scale test results

The measured depth values of the carbonized layer are shown in Tab. 2, with two measurements being made for each of the nine samples. The resulting values of the depth of the carbonized layer are the average values of these two measurements. The graphical representation of the results is shown in Fig. 5.

**Tab. 2** Measured values of the carbonized layer depth

**Tab. 2** Namerané hodnoty hĺbky zuhoľnatej vrstvy

Sample number and cross-section shape / Číslo vzorky a tvar prierezu	Depth of carbonized layer 1 (mm) / Hĺbka zuhoľnatej vrstvy 1 (mm)	Depth of carbonized layer 2 (mm) / Hĺbka zuhoľnatej vrstvy 2 (mm)	Average value (mm) / Priemerná hodnota (mm)
1 square cross-section 1 štvorcový prierez	9	9	9.0
2 square cross-section 2 štvorcový prierez	7	8	7.5
3 square cross-section 3 štvorcový prierez	6	8	7.0
1 cut edges cross-section 1 zrezané hrany	11	9	10.0
2 cut edges cross-section 2 zrezané hrany	17	16	16.5
3 cut edges cross-section 3 zrezané hrany	8	9	8.5

### 3 Výsledky

#### Výpočet zuhoľnatej vrstvy

Termická stabilita dreva je ovplyvnená hustotou dreveniny a chemickým zložením [14]. Hustota testovaných vzoriek bola v rozmedzí  $\rho = 380 \pm 8,4 \text{ kg/m}^3$ .

Pre uvedenú hustotu dreva sme návrhovú rýchlosť uhoľnatenia  $\beta_{0, \rho, t}$  vypočítali podľa rovnice (3) a následne hĺbku zuhoľnatej vrstvy  $d_{\text{char},0}$  podľa rovnice (2):

$\beta_{0, \rho, t} = 0,40 \text{ mm/min}$ ;  $d_{\text{char},0} = 12 \text{ mm}$ , ( $\beta_0 = 0,65$  z Tab. 1).

Z týchto výsledkov vyplýva, že hĺbka zuhoľnatej vrstvy by sa mala pohybovať do hodnoty 12 mm.

#### Vyhodnotenie strednorozmerového testu

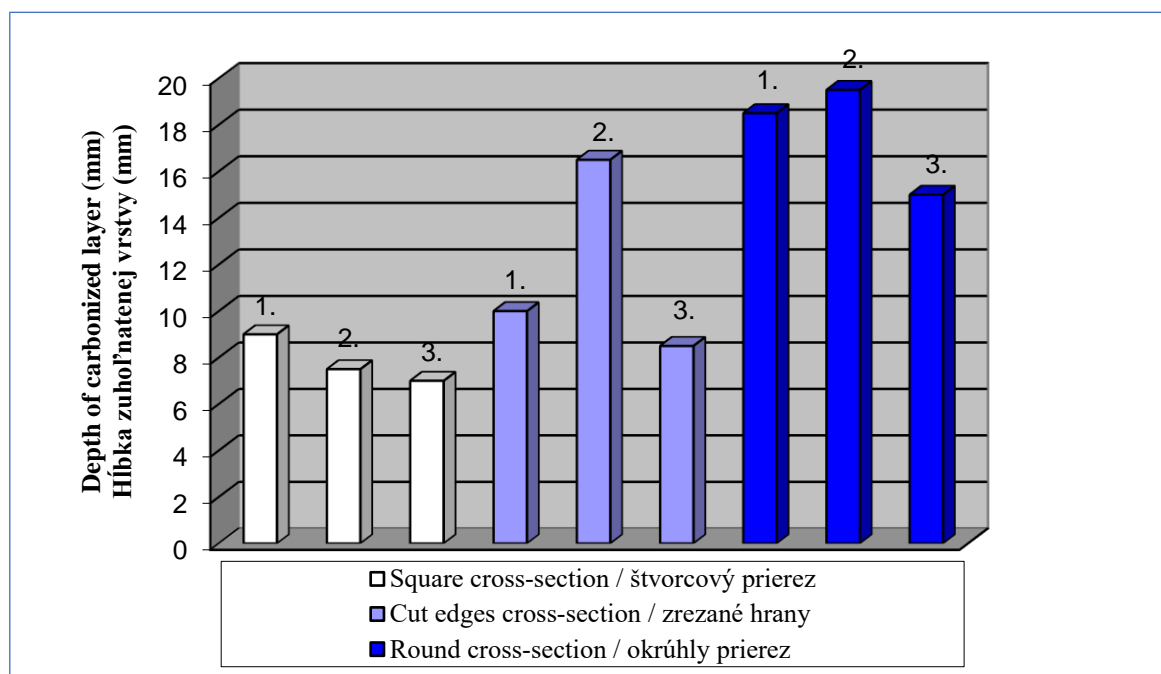
Namerané hodnoty hĺbky zuhoľnatej vrstvy sú uvedené v nasledujúcej Tab. 2, pričom pre každú z deviatich vzoriek sme urobili 2 merania. Výsledné hodnoty hĺbky zuhoľnatej vrstvy sú priemerné hodnoty z týchto dvoch meraní. Grafické znázornenie výsledkov vidíme na Obr. 5.



**Tab. 2** Measured values of the carbonized layer depth (continue)

**Tab. 2** Namerané hodnoty hĺbky zuhoľnatej vrstvy (pokračovanie)

Sample number and cross-section shape / Číslo vzorky a tvar prierezu	Depth of carbonized layer 1 (mm) / Hĺbka zuhoľnatej vrstvy 1 (mm)	Depth of carbonized layer 2 (mm) / Hĺbka zuhoľnatej vrstvy 2 (mm)	Average value (mm) / Priemerná hodnota (mm)
1 Round cross-section 1 Okrúhly prierez	19	18	18.5
2 Round cross-section 2 Okrúhly prierez	20	19	19.5
3 Round cross-section 3 Okrúhly prierez	15	15	15.0


**Fig. 5** Graphic depiction of the depth of the carbonized layer

**Obr. 5** Grafické znázornenie hĺbky zuhoľnatej vrstvy

In the calculations according to STN EN 1995-1-2 [15] we found that the depth of the carbonized layer is 12 mm. These values were clearly exceeded in case of round cross-section samples with diameter of 5.5 mm. The increased carbonization rate was also observed in case of sample no. 2 with cut edges. However, this was caused by the crack in the sample. Fig. 6 shows the carbonized layer of individual samples.

Vo výpočtoch podľa STN EN 1995-1-2 [15] sme zistili, že hĺbka zuhoľnatej vrstvy je 12 mm. Tieto hodnoty boli jednoznačne prekročené u vzoriek okrúhleho prierezu v priemere o 5,5 mm. Zvýšené zuhoľnatie sme zaznamenali aj pri vzorke č. 2 so zrezanými hranami, čo však bolo spôsobené vzniknutou prasklinou pri hrči vo vzorke. Na Obr. 6 je znázornená zuhoľnatá vrstva jednotlivých vzoriek.



a)



b)



c)

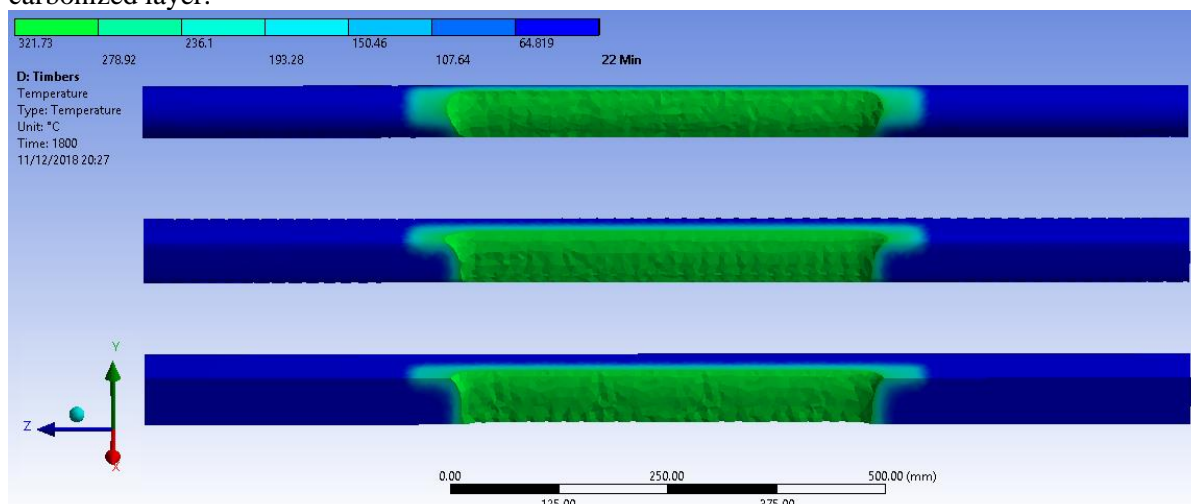
**Fig. 6** Carbonized layer a) round cross-section, b) cut edges cross-section, c) square cross-section  
**Obr. 6** Zuhofnatená vrstva a) guľacie, b) zrezané hrany, c) štvorcový prierez

### Simulation results

The result of the simulation is the graphical depiction of the degree of carbonization of wood beams over 30 minutes. In Fig. 7 are shown the simulated beams without a layer of carbonized wood, the area shown in the middle of the samples represents the range of the carbonized layer.

### Výsledky simulácie

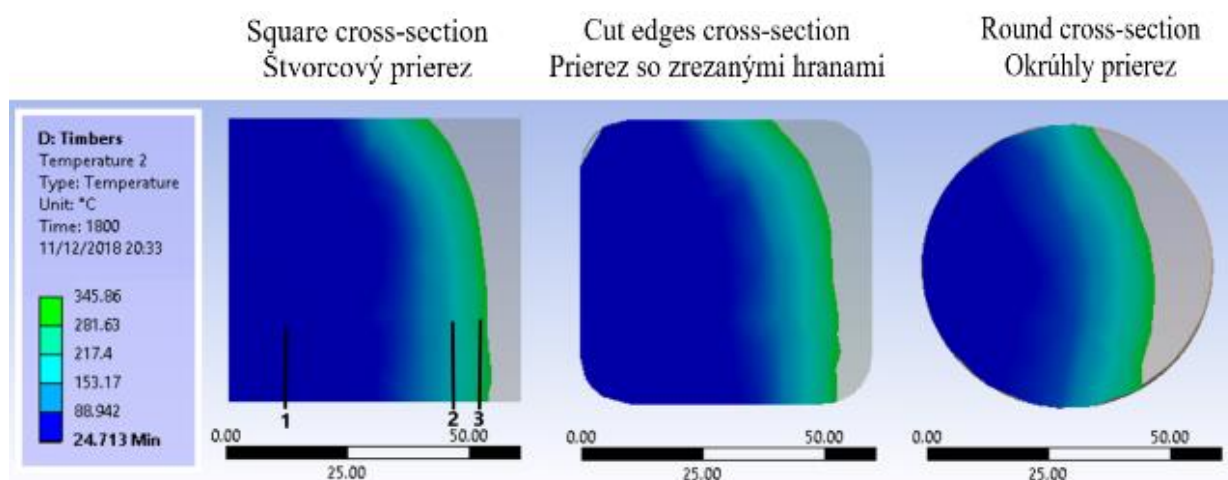
Výsledkom simulácie je znázornenie miery zuhofnatenia drevených nosníkov v čase 30 min. Na Obr. 7 sú zobrazené simulované nosníky bez vrstvy zuhofnateného dreva, oblasť znázornená v strede vzoriek predstavuje hranicu zuhofnatej vrstvy.



**Fig. 7** Beams carbonization range  
**Obr. 7** Hranica zuhofnatenia nosníkov

The length of the carbonized layer in the z-axis direction is almost the same in all three cases, reaching about 500 mm. However, the depth of the carbonized layer in the "x" direction is different. For a square cross-section, the average depth of carbonization was of 9.4 mm, for the square cross-section with cut edges of 8.8 mm and 10.1 mm for the round cross-section. In Fig. 8 is shown a profile of the beams and their carbonization in 30 min at a distance of 600 mm from their edge.

Dĺžka zuhoľnatej vrstvy v smere osi „z“ je vo všetkých troch prípadoch takmer rovnaká, dosahujúca rozmery okolo 500 mm. Hĺbka zuhoľnatej vrstvy v smere osi „x“ je však rozdielna. Pre štvorcový prierez bola priemerná hĺbka zuhoľnatenia 9,4 mm, pre štvorcový prierez so zrezanými hranami 8,8 mm a pre okrúhly prierez 10,1 mm. Na obr. 8 je znázornený profil nosníkov a ich zuhoľnatenie v čase 30 min. vo vzdialenosti 600 mm od ich okraja.



**Fig. 8** Beams profile and their carbonization

**Obr. 8** Profil nosníkov a ich zuhoľnatenie

The outer part on the right side of the cross section of the beams (Fig. 8) is a carbonized layer, the shape of which is different in each beam. Colored fields divide the beam exposed to the effects of fire into the following layers: the green color (number 3 in Fig. 8) shows the carbonized layer and the boundary of carbonization, the light blue color (number 2 in Fig. 8) shows the layer of pyrolysis, the dark blue color (number 1 in Fig. 8) shows thermally undamaged wood.

The degree of carbonization adversely affects the value of fire resistance of beams. In Tab. 3, there are shown the areas of the carbonized and non-degraded wood layer of the tested wood beams. An important indicator is the ratio of non-degraded and total cross-section area of the wood beam as it represents

Vonkajšia časť z pravej strany priečneho prierezu nosníkov na Obr. 8 predstavuje zuhoľnatenú vrstvu, ktorej tvar je v každom nosníku odlišný. Farebné polia rozdeľujú nosník namáhaný účinkami požiaru do nasledujúcich vrstiev: zelenou farbou (číslo 3 na Obr. 8) je znázornená zuhoľnatená vrstva a hranica uhoľnatenia, svetlomodrou farbou (číslo 2 na Obr. 8) je znázornená vrstva pyrolýzy, tmavomodrou farbou (číslo 1 na Obr. 8) je znázornené termicky nepoškodené drevo.

Miera zuhoľnatenia negatívne vplýva na hodnotu požiarnej odolnosti nosníkov. V Tab. 3 sú uvedené plochy zuhoľnatej a nedegradovanej vrstvy dreva skúmaných drevených nosníkov. Dôležitým ukazovateľom je pomer nedegradovanej a celkovej plochy prierezu dreveného nosníka, pretože znázorňuje

the area of the beam in a cross-section that is fully capable of transmitting the loading. According to the simulation, the beams with a square cross-section and with cut edges showed almost the same results. Significant difference was achieved mainly in comparison of the beams with square and round cross-section, where the rate of degradation and carbonization of the logs is higher.

plochu nosníka v priereze, ktorá je v plnej miere schopná prenášať zaťaženie. Podľa simulácie nosníky so štvorcovým prierezom a so zrezanými hranami obstáli takmer rovnako. Signifikantný rozdiel je hlavne v porovnaní štvorcového profilu a guľatiny, kde rýchlosť degradácie a zuhoľnatenia guľatiny je vyššia.

**Tab. 3** Surface dimensions of non-degraded and carbonized wood layers

**Tab. 3** Plošné rozmery vrstiev nedegradovaného a zuhoľnatého dreva

Beam	Total area of profile (mm <sup>2</sup> ) / Celková plocha profilu (mm <sup>2</sup> )	Carbonized layer area (mm <sup>2</sup> ) / Plocha zuhoľnatej vrstvy (mm <sup>2</sup> )	Non-degraded area (mm <sup>2</sup> ) / Nedegradovaná plocha (mm <sup>2</sup> )	Share of non- degraded from total area (%) / Podiel nedegradovanej a celkovej plochy (%)
Square cross-section Štvorcový prierez	3,600	565	2,173	60.36
Square cross-section with cut edges Štvorcový prierez so zrezanými hranami	3,505	530	2,084	59.46
Round cross-section Okrúhly prierez	2,827	606	1,357	48.00

The cross-section area of the non-degraded wood affects its bearing capacity and the fire resistance value. It is because the wood losses its mechanical properties in process of its thermal degradation. Based on the results, we can state that the round shape cross-section losses its mechanical properties in the cross-section more rapidly than the square cross-section. It is because of the mass loss in the non-degraded part of the wood.

#### 4 Discussion

Based on the results of the medium scale test, we can state that the depth of the carbonization increased depending on the shape of the sample cross-section. In the case of the square cross-section, it ranged from 7 to 9 mm in diameter. The depth of carbonization of

Plocha nedegradovaného dreva v priereze má vplyv na jeho nosnosť a hodnotu požiarnej odolnosti, a to v dôsledku toho, že drevo vplyvom tepelnej degradácie stráca svoje mechanické vlastnosti. Z výsledkov sa dá vyvodit', že okrúhly profil stráca v dôsledku úbytku nedegradovanej časti dreva v priereze svoje mechanické vlastnosti v porovnaní so štvorcovým prierezom rýchlejšie.

#### 4 Diskusia

Na základe výsledkov strednorozmerového testu môžeme konštatovať, že hĺbka zuhoľnatenia sa zväčšovala v závislosti na tvare prierezu vzorky. Pri štvorcovom priereze sa pohybovala v priemere od 7 – 9 mm, pri priereze so zrezanými hranami v priemere od 8,5 – 10 mm (ak neuvažujeme chybnú

cross-section with cut edges ranged in interval of 8.5 to 10 mm on average (if we do not consider the wrong sample 2) and in case of the round cross-section we recorded an average depth of carbonization in range of 15 to 19.5 mm. The depth of the carbonization layer of the square cross-section and the cross-section with the cut edges experimentally determined corresponded with the depth of carbonization  $d_{char,0} = 12$  mm calculated according to STN EN 1995-1-2 [1].

The geometric shape of the material significantly influences the possibility of ignition, the rate and intensity of the burning process [15]. In the case of a rounded cross-section, in case of flame burning, the flame occurred on the opposite side of the sample from the radiation panel. For samples with cut edges cross-section, the carbonized layer was formed at rounds at the top and bottom of the sample (Fig. 6 b). For samples with sharp edges (square cross-section) we noticed flame burning and formation of the carbonized layer only on the side facing the radiation panel (Fig. 6 c). The differences in carbonization in individual samples were due to the fact that the extent of the loaded area was different in case of tested sample cross-sections, depending on their geometrical shape, while the intensity and area of radiation of the radiant heat source was not changed. The samples with rounded cross-section and the cut edges cross-section showed more intense flame burning and thus a greater depth of the carbonization layer.

The issue of the depth of the carbonized layer was also focused by Martinka et al. [16], but for its determination the authors applied different methodology. They tested the wood samples of Norway spruce and Scotch with dimensions of 100 x 100 x 50 mm. The loading of the test samples was performed with a conical calorimeter for 10, 20 and 30 min. After a predetermined time of heat loading, the test sample was extinguished and placed in a water container. The test samples were dried and cut in the center. The depth of the carbonization the authors calculated as the difference between the original cross-sectional width and the width of the residual cross-section. The authors obtained

vzorku č. 2) a pri okrúhlom priereze sme zaznamenali priemernú hĺbku zuhoľnatenia od 15 – 19,5 mm. Hĺbka zuhoľnatej vrstvy štvorcového prierezu a prierezu so zrezanými hranami zistená experimentálne je v zhode s vypočítanou hĺbkou zuhoľnatenia  $d_{char,0} = 12$  mm podľa STN EN 1995-1-2 [1].

Geometrický tvar materiálu podstatne vplýva na možnosť zapálenia, rýchlosť a intenzitu procesu horenia [15]. Pri okrúhlom priereze sa pri plameňovom horení vyskytol plameň aj na odvrátenej strane vzorky od radiačného panela. Pri vzorkách so zrezanými hranami sa zuhoľnatená vrstva vytvárala pri zaobleniach na hornej aj spodnej strane vzorky (Obr. 6 b). Pri vzorkách s ostrými hranami (štvorcový prierez) sme zaznamenali plameňové horenie a tvorbu zuhoľnatej vrstvy iba na strane otočenej k radiačnému panelu (Obr. 6 c). Uvedené rozdiely v uhoľnatení boli pri jednotlivých vzorkách spôsobené tým, že veľkosť namáhanej plochy bola pri jednotlivých prierezoch vzoriek rozdielna, v závislosti od ich geometrického tvaru, pričom intenzita a plocha vyžarovania sálavého zdroja tepla sa nemenila. Pri okrúhlom priereze a zaoblených hranách vzoriek tým dochádzalo k intenzívnejšiemu plameňovému horeniu a tým aj ku vzniku väčšej hĺbky zuhoľnatej vrstvy.

Hĺbkou zuhoľnatej vrstvy sa zaoberali aj Martinka a kol. [16], avšak pre jej stanovenie autori zvolili inú metodiku. Experimentu sa podrobili skúšobné vzorky smreka obyčajného a borovice lesnej rozmerov 100 x 100 x 50 mm. Zaťaženie skúšobných vzoriek sa vykonávalo kónickým kalorimetrom po dobu 10, 20 a 30 min. Po vopred stanovenom čase tepelného namáhania bola skúšobná vzorka uhasená a vložená do nádoby s vodou. Skúšobné vzorky boli vysušené a v strede prerezané. Hĺbku zuhoľnatenia autori dostali ako rozdiel medzi pôvodnou šírkou prierezu a šírkou zostatkového prierezu. Autori dospeli k nasledovným výsledkom pre skúšobnú vzorku zo smrekového dreva (výsledky po 30 min):

- pri tepelnom toku 20 kW/m<sup>2</sup> bola

the following results for the Norway spruce wood samples (results after 30 min):

- At a thermal flow of 20 kW / m<sup>2</sup> the depth of carbonization was of 22 mm,
- At a thermal flow of 30 kW / m<sup>2</sup> the depth of carbonization was of 28 mm,
- At a thermal flow of 40 kW / m<sup>2</sup> the depth of carbonization was of 33 mm,
- At a thermal flow of 50 kW / m<sup>2</sup> the depth of carbonization was of 36 mm.

In this test [16] and our test, the same type of wood was used, the geometric shape of the test specimen, the loading time of the test sample and the heat flow (50 kW / m<sup>2</sup>). In our test, the depth of the carbonized layer for the square cross-section test sample was in range of 6 and 9 mm. Martinka et al. [16] reached the carbonized layer depth of 36 mm after 30 min. Differences in the results obtained are due to the different thermal loading of the test samples and the methods used.

The results obtained by simulation of the medium-scale test confirmed the results achieved in the experiment. Although the depth of carbonization in case of the round cross-section reached lower value (10.1 mm) compared to the depth of carbonization achieved by the test (15 - 19.5 mm), the share of the non-degraded and the total cross-section profile area of the round cross-section was 48%, i.e. the lowest value of the tested samples.

Fonseca and Barreira [17] assessed the depth of carbonization by experimental and numerical methods. For the numerical method, they chose the Ansys program, which they described as a program for analyzing the behavior of wooden elements that are loaded by high temperatures. In the experimental method, 9 samples had undergone the thermal loading. During the experiment, the temperature course was measured at five points of the test sample (10, 20, 30, 50 and 250 mm far from the exposed side). The authors divided the samples into the zone of the carbonized layer, the pyrolysis zone and the non-degraded wood, and came to the following conclusions:

- At a distance of 10 mm from the exposed side, after 33 min, a carbonized layer is formed with a characteristic temperature of 700-800 ° C (until the experiment is completed),
- At a distance of 20 mm from the exposed side, a carbonized layer is

hĺbka zuhoľnatenia 22 mm;

- pri tepelnom toku 30 kW/m<sup>2</sup> bola hĺbka zuhoľnatenia 28 mm;
- pri tepelnom toku 40 kW/m<sup>2</sup> bola hĺbka zuhoľnatenia 33 mm;
- pri tepelnom toku 50 kW/m<sup>2</sup> bola hĺbka zuhoľnatenia 36 mm.

Pri tomto teste [16] a našom teste bol totožný druh dreveniny, geometrický tvar skúšobnej vzorky, doba namáhania skúšobnej vzorky a tepelný tok (50 kW/m<sup>2</sup>). V našom teste bola hĺbka zuhoľnatej vrstvy pre skúšobnú vzorku s ostrými hranami medzi 6 – 9 mm. Martinka a kol. [16] dosiahli po 30 min. hĺbku zuhoľnatej vrstvy až 36 mm. Diferencie v dosiahnutých výsledkoch sú v dôsledku rozdielneho tepelného namáhania skúšobnej vzorky a v použitých metodikách.

Výsledky dosiahnuté simuláciou strednorozmerového testu potvrdili výsledky dosiahnuté experimentom. Aj keď hĺbka zuhoľnatenia pri okrúhлом priereze dosiahla simuláciou nižšiu hodnotu (10,1 mm) v porovnaní s hĺbkou zuhoľnatenia dosiahnutou testovaním (15 – 19,5 mm), podiel nedegradovanej a celkovej plochy priečného profilu okrúhleho prierezu bol 48 %, čiže najnižšia hodnota z testovaných vzoriek.

Fonseca a Barreira [17] posudzovali hĺbku zuhoľnatenia prostredníctvom experimentálnej a numerickej metódy. Pre numericke metódy zvolili program Ansys, ktorý popísali ako program pre analýzu správania sa drevených prvkov, ktoré sú namáhané vysokými teplotami. Pri experimentálnej metóde sa 9 skúšobných vzoriek podrobilo tepelnému namáhaniu. V priebehu experimentu sa sledovali teplotné priebehy v piatich bodoch skúšobnej vzorky (10, 20, 30, 50 a 250 mm od exponovanej strany). Autori rozdelili jednotlivé vzorky do zóny zuhoľnatej vrstvy, zóny pyrolýzy a neporušeného dreva a dospeli k nasledovným záverom:

- vo vzdialenosti 10 mm od exponovanej strany sa po 33 min vytvorí zuhoľnatená vrstva a je pre ňu charakteristická teplota 700-800 ° C (až do ukončenia experimentu),
- vo vzdialenosti 20 mm od exponovanej strany sa po 42 min vytvára zuhoľnatená vrstva, pričom teplota v tomto mieste po 60 min. je 400-600 °C,

formed after 42 min, a carbonized layer is formed, while the temperature in this place is in range of 400 – 600 °C after 60 min,

- At a distance of 30 mm from the exposed side, there is no carbonized layer formed, the temperature is less than 300 °C,
- At a distance of 250 mm from the exposed side, there is the thermally non-degraded wood. The temperature in this place is 16 °C after 60 min.

These results correspond to the results introduced in Fig. 8, according to which the temperature at a distance of 30 mm from the exposed side of the square cross-section and the cross-section with the cut edges was in range of 24.7 °C to 88.9 °C. In case of the round cross-section the temperature was of 153.17 °C - 281 °C.

## Conclusions

The results of the measurements and calculations confirmed that the geometric shape of the cross-section of the wooden bearing elements (beams, bearers, ceilings) affects the depth of the carbonized layer. The carbonized layer detected by the medium-scale test for the individual cross-section shapes of the wood beams corresponded to the calculated values according to STN EN 1995-1-2 [1], with the exception of the round cross-section, where the depth of carbonization was about 5.5 mm higher on average. These results were also confirmed by simulation of the medium-scale test in the Ansys 18.1 program. The carbonized layer of the beam with square cross-section and of beam with cut edges cross-section had approximately the same depth. The round cross-section beam also reached the highest depth of carbonization, although lower than in the experiment. The fact that the round cross-section of the wood beams is the most vulnerable to the formation of the carbonized layer, also confirmed the results of the evaluation of the non-degraded and the total area of the tested samples transverse profile. According to the simulation, the beams with a square cross-section and the cut edges cross-section reached the share of 60%, while the round cross-section of about 12% lower, indicating that the degradation and carbonization of the log is faster.

- vo vzdialenosti 30 mm od exponovanej strany nedochádza k vytvoreniu zuhoľnatej vrstvy, teplota je pod 300 °C,
- vo vzdialenosti 250 mm od exponovanej strany je termicky nedegradované drevo, teplota v tomto mieste po 60 min. je 16 °C.

Uvedené výsledky korešponujú s výsledkami podľa Obr. 8, podľa ktorého teplota vo vzdialenosti 30 mm od exponovanej strany štvorcového prierezu a prierezu so zrezanými hranami sa pohybuje od 24,7 °C – 88,9 °C. Pri okrúhlym priereze je to 153,17 °C – 281 °C.

## Záver

Výsledky vykonaných meraní a výpočtov potvrdili, že geometrický tvar prierezu drevených nosných prvkov (nosníkov, trámov, stropníc) má vplyv na hĺbku zuhoľnatej vrstvy. Zuhoľnatá vrstva zistená strednorozmerovým testom pre jednotlivé tvary prierezu drevených nosníkov zodpovedala vypočítaným hodnotám podľa STN EN 1995-1-2 [1], s výnimkou okrúhleho prierezu, pri ktorom vznikla hĺbka zuhoľnatia v priemere o 5,5 mm vyššia. Uvedené výsledky sa potvrdili aj simuláciou strednorozmerového testu programom Ansys 18.1. Zuhoľnatá vrstva nosníka so štvorcovým prierezom a so zrezanými hranami mala približne rovnakú hĺbku, okrúhly prierez dosiahol aj v tomto prípade najvyššiu hĺbku zuhoľnatia, aj keď nižšiu ako pri experimente. Skutočnosť, že okrúhly prierez drevených nosníkov je na tvorbu zuhoľnatej vrstvy najzraniteľnejší, potvrdili aj výsledky vyhodnotenia podielu nedegradovanej a celkovej plochy priečného profilu skúmaných vzoriek. Podľa simulácie nosníky so štvorcovým prierezom a so zrezanými hranami dosiahli uvedený podiel 60 %, pričom okrúhly prierez o 12 % nižší, z čoho vyplýva, že degradácia a zuhoľnatie guľatiny prebieha rýchlejšie.

Dosiahnuté výsledky ukázali, že pri navrhovaní konštrukčných prvkov drevostavieb na účinky požiaru je potrebné klásť väčší dôraz na nosné prvky z guľatiny, pretože sú náchylnejšie na plameňové horenie a na tvorbu zuhoľnatej vrstvy a tým aj na stratu svojich mechanických vlastností.

The results obtained have shown that when designing structural elements of timber structures for the effects of fire, greater emphasis has to be placed on the bearing elements made of logs because they are more vulnerable to flame burning and to the formation of the carbonization layer and thus to the loss of its mechanical properties.

### Acknowledgement

This work was supported by Slovak Research and Development Agency based on the Agreement no. APVV-17-0005 (40 %) and VEGA and KEGA Grant Agencies of the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic and Slovak Academy of Sciences under the projects VEGA 1/0493/18 (40 %) and KEGA 009TU Z-4/2017 (20%).

### References / Literatúra

- [1] STN EN 1995-1-2: 2008: Eurokód 5: Navrhovanie drevených konštrukcií. Časť - 2: Všeobecné pravidlá. Navrhovanie konštrukcií na účinky požiaru / Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-2: General. Structural fire design.
- [2] Čabalová, I., Kačík, F., Kačíková, D., Oravec, M. 2013. Vplyv sálavého ohrevu na chemické zmeny smrekového dreva / The influence of radiant heating on chemical changes of spruce wood. Acta Facultatis Xylogologiae. 55(2):59-66.
- [3] Kučera, P., Česelská, T., Matečková, P., 2010. Požární odolnost stavebních konstrukcí / Fire Resistance of Building Constructions. SPBI.
- [4] Osvald, A. 2011. Drevostavba ≠ požiar / Timber Structure ≠ Fire. Technická univerzita vo Zvolene .
- [5] Leško, R., Lopušniak, M. 2015. Požiarna odolnosť drevených prvkov a konštrukcií viacpodlažnej budovy stanovená podľa Eurokódu 5 / Fire resistance of timber elements and structures in multi-storey building determined by Eurocode 5. Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen 57(2):135-144.
- [6] Vavrušková K., Lokaj A. 2009. Požární odolnost dřevěných konstrukcí / Fire Resistance of Wooden Constructions. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava 1:25-30.
- [7] Kuklík, P. 2005. Dřevěné konstrukce / Wooden Constructions. ČKAIT.
- [8] Štefko, J., Reinprecht, L., Kuklík, P. 2006. Dřevěné stavby. Konstrukce, ochrana a údržba / Timber Structures. Constructions, Protection and Maintenance. 2<sup>nd</sup> ed. Jaga group.
- [9] Koželouh, B., 1998. Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5. Step 1. Navrhování a konstrukční materiály / Wooden Constructions in terms of Eurocode 5. Step 1. Design and Construction Materials. KODR, Ing. Koželouh.
- [10] Blass, H. J. 1995. Timber engineering: STEP 1: Basis of design, material properties, structural components and joints. Centrum Hout, 1995.
- [11] König, J.: 2004. Structural fire design according to Eurocode 5 – design rules and their background. Fire and Materials 29:147-163.
- [12] Buchanan, A. H. 2001. Structural design for fire safety. John Wiley & Sons.
- [13] Tereňová, L. 2007. Súčasná drevostavba z hľadiska protipožiarinej bezpečnosti / The existing wooden buildings in terms of fire safety. Delta 1(2):30-33.

### Pod'akovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-17-0005 (40 %). Táto práca bola podporovaná Grantovou agentúrou MŠVVaŠ SR a SAV “VEGA č. projektu 1/0493/18” (40 %) a “KEGA č. projektu 009TU Z-4/2017” (20%).



[14] Kačíková, D. 2011. Porovnanie hmotnostných úbytkov, rýchlosti odhorievania a hrúbky zuhoľnatej vrstvy pri termickej degradácii vybraných ihličnatých drevín / Comparison of the weight loss, the rate of degradation and the thickness of the char layer in the thermal degradation of selected coniferous trees. Kolokvium 2011: Zborník príspevkov ku grantovým úlohám VEGA [CD-ROM] 1:93-97.

[15] Osvald, A. 1997. Požiarnotechnické vlastnosti dreva a materiálov na báze dreva / Fire and technical properties of wood and wood-based materials. Technická univerzita vo Zvolene.

[16] Martinka, J., Rantuch, P., Liner, M. 2018. Calculation of charring rate and char depth of spruce and pine wood from mass loss. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 132:1105-1113.

[17] Fonseca, E.M.M., Barreira, L.M.S. 2009. Charring rate determination of wood pine profiles submitted to high temperatures. Safety and security engineering 3:449-457.

[18] ANSYS Inc. 2013. ANSYS Mechanical APDL Thermal Analysis Guide.