

POSÚDENIE POŽIARNEHO RIZIKA TERMICKY MODIFIKOVANÉHO SMREKOVÉHO DREVA

FIRE RISK ASSESSMENT OF THERMALLY MODIFIED SPRUCE WOOD

Jozef Martinka – Emília Hroncová – Tomáš Chrebet – Karol Balog

ABSTRACT

The presented article deals with the thermally modified spruce wood fire risk assessment. The assessment was based on comparison of heat release rate and carbon monoxide yield from thermally modified and thermally unmodified samples. The heat release rate and carbon monoxide yield were determined by the means of cone calorimeter at two different heat flux densities (15 and 20 kW·m⁻²). There were used three kinds of samples: thermally unmodified sample and thermally modified sample according to ThermoWood – Thermo-S programme (maximum temperature during the thermal modification was 190 °C) and according to ThermoWood – Thermo-D programme (maximum temperature during the thermal modification was 212 °C). Obtained results indicated, that thermally modified spruce wood showed lower maximum heat release rate and also lower average heat release rate, although mentioned parameters were dependent on external heat flux from cone heater. In addition, thermally modified samples showed higher total carbon monoxide yield (in full time investigated period from 0 to 1800 s) but the effect of thermal modification was not clear (depended on external heat flux density and maximum temperature during thermal modification) in the first time period (from 0 to 600 s) of investigation.

Keywords: carbon monoxide yield, fire risk assessment, heat release rate, spruce wood, thermowood.

ÚVOD

Termicky modifikované drevo („termodrevo“) je pomerne nový typ drevného materiálu, ktorý sa priemyselne vyrába už vyše 15 rokov vo Fínsku, Holandsku, Francúzsku i ďalších členských štátoch EU, ale aj v iných krajinách sveta, dnes približne v množstve 240 000 m³/rok (REINPRECHT a VIDHOLDOVÁ 2011). Výroba termicky modifikovaného dreva spočíva v tepelnom zaťažení dreva zvoleným teplotným programom v oxidačnej alebo inertnej atmosfére. Pri termickej modifikácii sa drevo zahrieva maximálne na teploty približne 150 až 280 °C, počas niekoľko desiatok hodín. Termická modifikácia sa vykonáva v plynnom (napr. vzduch alebo dusík) alebo kvapalnom (napr. rastlinné oleje) prostredí. Maximálna teplota pri termickej modifikácii závisí predovšetkým od prostredia v ktorom sa vykonáva a vo všeobecnosti platí, že je vyššia v inertnom prostredí. Pri termickej modifikácii dochádza k čiastočnému rozloženiu a odbúraníu

termicky najmenej odolných zložiek dreva (predovšetkým polysacharidov a sprievodných zložiek).

Termická modifikácia dreva zvyšuje jeho odolnosť voči biologickej degradácii a poveternostným vplyvom, zlepšuje jeho estetickú hodnotu, rozmerovú stabilitu, tepelnoizolačné a akustické vlastnosti a súčasne znižuje jeho hygroskopicitu. Hlavnou nevýhodou termicky modifikovaného dreva je zhoršenie väčšiny jeho mechanických vlastností (najmä rázovej húževnatosti, pevnosti a tvrdosti). Niektoré mechanické vlastnosti sa môžu pri termickej modifikácii aj zlepšiť (modul pružnosti a za určitých podmienok aj tvrdosť) (REINPRECHT a VIDHOLDOVÁ 2011).

Viacero vedeckých prác sa zaoberalo výskumom vplyvu termickej modifikácie dreva na zmenu jeho fyzikálnych, mechanických a technických vlastností, zvýšenie trvanlivosti, ale aj zmenu jeho chemického zloženia a toxicity extraktívnych látok.

Vplyv pôsobenia teplôt 190, 210, 230 a 245 °C v časových intervaloch 0, 0,3, 1, 4, 8 a 16 hodín, na úbytok hmotnosti a zmenu chemického zloženia a rozmerov vzoriek dreva buka lesného (*Fagus sylvatica* L.), borovice lesnej (*Pinus sylvestris* L.) a smreka obyčajného (*Picea abies* L.) skúmal GONZÁLES-PEÑA *et al.* (2009). Z prezentovaných výsledkov vyplýva, že obsah lignínu narastá a obsah polysacharidov v rezistentnom zvyšku klesá predovšetkým vo vzorkách zaťažených vyššími teplotami (230 a 245 °C) počas dlhších časových intervalov (8 a 16 hodín). Naopak obsah vybraných stanovovaných stavebných jednotiek hemicelulóz bol vo všetkých skúmaných vzorkách zaťažených teplotou 245 °C počas 16 hodín rádovo nižší v porovnaní s termicky nemodifikovanými vzorkami. Rozmery skúmaných vzoriek v tangenciálnom a radiálnom smere klesali s úbytkom hmotnosti takmer lineárne. Závislosť rozmerov v priečnom smere od úbytku hmotnosti bola kvadratická (maximálny rozmer v riečnom smere vykazovali vzorky pri úbytku hmotnosti približne 10 %). Vplyv zaťaženia smrekového dreva teplotami v intervale 113 až 271 °C počas 90 minút v atmosfére vzduchu na úbytok hmotnosti, výťažok TAPPI lignínu a dioxánového lignínu skúmali KAČÍKOVÁ a KAČÍK (2009). Z prezentovaných výsledkov vyplýva, že k výraznejšiemu úbytku hmotnosti smrekového dreva dochádza od teploty približne 200 °C. Od uvedenej teploty výrazne narastal podiel TAPPI lignínu a naopak klesalo množstvo dioxánového lignínu v rezistentnom zvyšku. Zmeny extraktívnych látok a makromolekulových charakteristík celulózy po termickej degradácii smrekového dreva skúmala KUČEROVÁ *et al.* (2011). Podľa citovaného autorského kolektívu vzrastalo v smrekovom dreve termicky zaťaženom počas 90 minút teplotným programom podľa teplotných kriviek PAR1, PAR2 a TNK (STN 13501-2:2005) množstvo extraktívnych látok a mierne klesal priemerný polymerizačný stupeň celulózy. Vplyv nízkych teplôt (do 70 °C) a pôvodného obsahu vlhkosti v rezive bukového dreva na zmenu jeho farby posúdili DZURENDA a DELIISKY (2012). Podľa citovaných autorov sušenie bukového reziva z absolútnej vlhkosti 70 % na 8 % v komorovej sušiarňi reziva v intervale teplôt sušiaceho prostredia 37 až 65 °C nespôsobí zmenu jeho farby. Vzájomný vzťah medzi molekulovou štruktúrou termicky modifikovaného dreva a jeho vybranými mechanickými vlastnosťami podrobne popisujú napr. REINPRECHT *et al.* (1999) a SOLÁR *et al.* (2001).

Vlastnosti a chemické zmeny termicky modifikovaného dreva významne závisia aj od atmosféry v ktorej bolo vyrobené (oxidačná, resp. neoxidačná atmosféra). Podľa REINPRECHTA a VIDHOLDOVEJ (2011) drevo termicky modifikované v inertnej atmosfére (za inak nezmenených podmienok) vykazuje lepšie mechanické vlastnosti v porovnaní s drevom modifikovaným v oxidačnej atmosfére (vzduchu). CANDELIER *et al.* (2013) porovnali vplyv dusíka a vákua na množstvo celulózy, hemicelulózy, lignínu a extraktívnych látok v termicky modifikovanom bukovom dreve. Z uvádzaných výsledkov vyplýva, že atmosféra má najvýznamnejší vplyv na obsah hemicelulóz

v rezistentnom zvyšku, pričom v atmosfére dusíka bol stanovený podstatne vyšší hmotnostný úbytok hemicelulózy v porovnaní s úbytkom v atmosfére tvorenej technickým vákuom.

Významné zmeny vybraných extraktívnych látok nastávajú už pri teplotách podstatne nižších, ako sú teploty bežne používané pri výrobe termicky modifikovaného dreva. Napr. podľa KAČÍKA *et al.* (2012) tepelné zaťaženie jedľového dreva počas 10 hodín teplotou 60 °C spôsobí pokles obsahu terpenov až o 62 %. Tepelné zaťaženie teplotou 120 °C počas rovnakého časového intervalu spôsobí pokles obsahu terpenov o viac, ako 99 %.

Vplyv termickej modifikácie na zvýšenie biologickej odolnosti dreva posúdili napr. REINPRECHT a VIDHOLDOVÁ (2011), BOONSTRA a TJEERDSMA (2006), WEILAND a GUYONNET (2003), KAMDEM *et al.* (2000) a REINPRECHT (1996). Prezentované výsledky potvrdzujú, že termická modifikácia významne zvyšuje biologickú odolnosť modifikovaného dreva. Odolnosť termicky modifikovaného borovicového dreva voči fotodegradácii posúdil HUANG *et al.* (2012). Podľa citovaného autorského kolektívu termicky modifikované borovicové drevo nevykazuje významne vyššiu odolnosť voči fotodegradácii povrchovej štruktúry. Vplyv tepelnej modifikácie na ekotoxickosť extraktívnych látok vo vodnom a etanolovom extrakte z borovicového dreva skúmali ESTEVES *et al.* (2011). Výsledky výskumu naznačujú, že termická modifikácia borovicového dreva nemá významný vplyv na ekotoxickosť jeho etanolového a vodného extraktu.

Relatívne málo vedeckých prác bolo zameraných na výskum vplyvu termickej modifikácie dreva na zmenu jeho požiarnej charakteristiky. Vplyv termickej modifikácie dreva na zmenu jeho požiarnej charakteristiky posúdila THERMOWOOD ASSOCIATION (2003) na základe skúšok podľa EN 13823, ISO 5660 a BS467-7. Termicky modifikované drevo pri skúškach podľa uvedených technických noriem nevykazovalo významný rozdiel v požiarnej charakteristikách. Podľa WANGA a COOPERA (2007) má však termicky modifikované drevo vyrobené v horúcich rastlinných olejoch nižšiu odolnosť voči šíreniu plameňa.

Požiarne riziko materiálu môže byť najlepšie posúdené na základe rýchlosti uvoľňovania tepla (BABRAUSKAS a PEACOCK 1992) a výtazku oxidu uhoľnatého za podmienok požiaru. Z hľadiska ohrozenia osôb počas požiaru je kľúčový výtazok oxidu uhoľnatého (ako toxikologicky najvýznamnejšej splodiny horenia) a rýchlosť uvoľňovania tepla v prvej fáze rozvoja požiaru (prvá fáza rozvoja bežného vnútorného požiaru trvá približne 10 minút). Cieľom príspevku je posúdiť vplyv termickej modifikácie dreva smreka obyčajného (*Picea abies* L.) na rýchlosť uvoľňovania tepla a výtazok oxidu uhoľnatého pri hustotách tepelných tokov typických pre iniciáciu požiaru a jeho prechod z (takmer) lineárneho rozvoja doplnne rozvinutého požiaru (15 a 20 kW·m⁻²).

EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

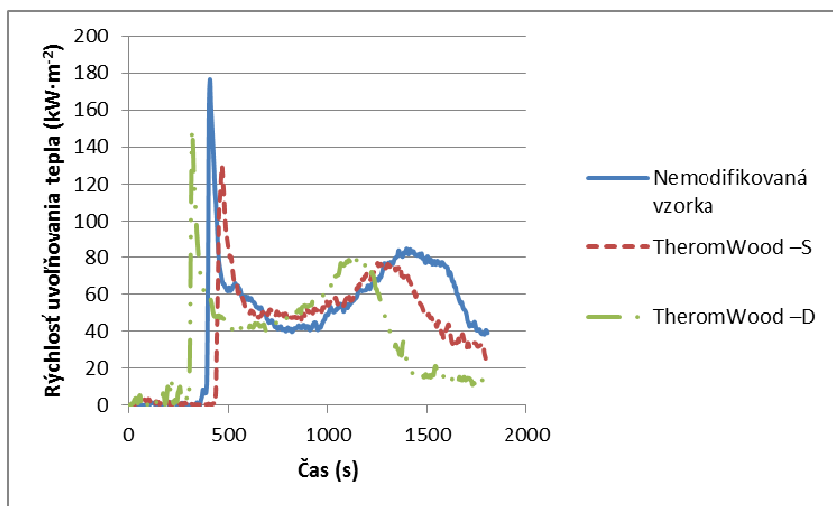
Na výskum boli použité vzorky dreva smreka obyčajného (*Picea abies* L.) s rozmermi 100 × 100 × 20 mm. Vzorky boli rozdelené na tri skupiny po desať kusov. Prvú skupinu tvorili vzorky termicky nemodifikovaného dreva. Druhá skupina bola termicky modifikovaná tepelným programom pre výrobu TheromWood – Thermo-S (v prvej fáze ohrev z 20 na 100 °C počas 5 hodín a následne zo 100 na 130 °C počas 13 hodín, v druhej fáze ohrev zo 130 na 190 °C počas 5,5 hodín s následnou výdržou na teplote 190 °C počas 3 hodín, v tretej fáze postupné ochladenie zo 190 na 20 °C počas 9,5 hodín). Tretia skupina vzoriek bola termicky modifikovaná programom pre výrobu TheromWood – Thermo-D (v prvej fáze ohrev z 20 na 100 °C počas 5 hodín a následne

zo 100 na 130 °C počas 13 hodín, v druhej fáze ohrev zo 130 na 212 °C počas 5,5 hodín s následnou výdržou na teplote 212 °C počas 3 hodín, v tretej fáze postupné ochladenie z 212 na 20 °C počas 9,5 hodín). Termická modifikácia bola realizovaná v atmosfére čistého vzduchu pri atmosférickom tlaku. Všetky vzorky boli pred samotnou skúškou na kónickom kalorimetri vlhkosťne kondicionované na absolútnu vlhkosť 6 %. Priemerná hustota termicky nemodifikovaných vzoriek a vzoriek pred termickou modifikáciou bola $335 \pm 7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. Priemerná hustota vzoriek termicky modifikovaných pri teplote 190 °C bola $322 \pm 5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ a priemerná hustota vzoriek termicky modifikovaných pri teplote 212 °C bola $316 \pm 8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. Rozdiely v hustote boli spôsobené úbytkom hmotnosti pri termickej modifikácii.

Rýchlosť uvoľňovania tepla a výťažok oxidu uhoľnatého skúmaných materiálov bol stanovený na kónickom kalorimetri skúšobným postupom vychádzajúcim z ISO 5660-1:2002. Rýchlosť uvoľňovania tepla a výťažok oxidu uhoľnatého boli merané pri hustotách tepelných tokov typických pre iniciáciu požiaru a jeho prechod z fázy (takmer) lineárneho rozvoja do fázy plne rozvinutého požiaru (15 a $20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$). Uvedené hustoty tepelných tokov KARLSSON a QUINTIERE (2000) považujú za kritické z hľadiska vzniku javu flash-over (nelineárna fáza rozvoja požiaru z lokálneho do plne rozvinutého). Každé meranie bolo opakované päťkrát, pričom ako výsledné sú uvádzané priemerné hodnoty. Pre zabezpečenie možnosti vzájomného porovnania získaných výsledkov bol zvolený rovnaký čas trvania skúšky (30 minút) pre všetky skúmané materiály a hustoty tepelných tokov. Podrobný popis požiarnej charakteristiky smrekového dreva uvádza napr. ZACHAR *et al.* (2012).

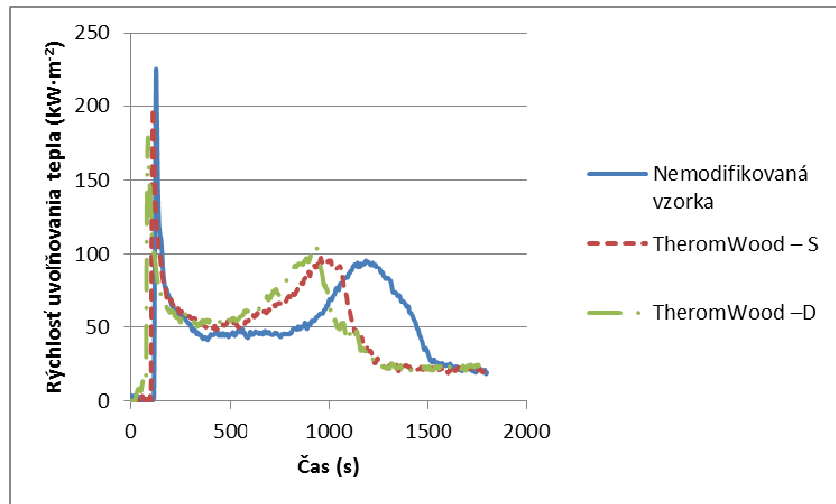
VÝSLEDKY A DISKUSIA

Vplyv termickej modifikácie na rýchlosť uvoľňovania tepla zo smrekového dreva pri hustote externého tepelného toku $15 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ je znázornený na obr. 1 a pri hustote tepelného toku $20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ na obr. 2.



Obr. 1 Rýchlosť uvoľňovania tepla z termicky modifikovaného a nemodifikovaného smrekového dreva zaťažného externým tepelným tokom $15 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Fig. 1 Heat release rate of thermally modified and unmodified spruce wood loaded by $15 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ external heat flux.

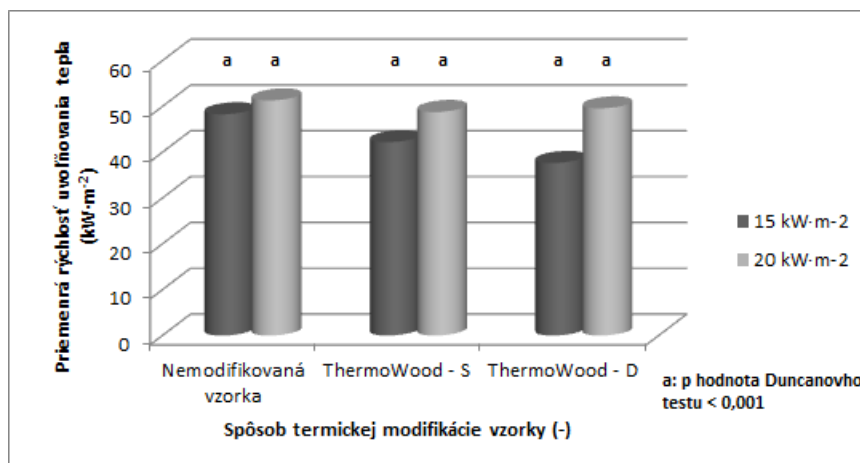


Obr. 2 Rýchlosť uvoľňovania tepla z termicky modifikovaného a nemodifikovaného smrekového dreva zaťaženého externým tepelným tokom $20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Fig. 2 Heat release rate of thermally modified and unmodified spruce wood loaded by $20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ external heat flux.

Z vizuálnej analýzy obr. 1 a 2 vyplýva, že termicky modifikované smrekové drevo vykazuje nižšiu maximálnu rýchlosť uvoľňovania tepla (prvý peak). U termicky modifikovaného dreva bolo súčasne pozorované bezplameňové horenie (žeravenie) tuhého uhlíkového zvyšku (druhý peak) po kratšom časovom intervale od zaťaženia vzorky externým tepelným tokom (v porovnaní s termicky nemodifikovaným drevom). Uvedené javy boli spôsobené skutočnosťou, že pri termickej modifikácii boli rozložené termicky najlabilnejšie zložky dreva (časť sprievodných zložiek a hemicelulóz), tak ako to vyplýva z výsledkov vedeckých prác KAČÍKA *et al.* (2012), REINPRECHTA a VIDHOLDOVEJ (2011), GONZÁLES-PEÑA *et al.* (2009), KAČÍKOVEJ a KAČÍKA (2009), KAČÍKOVEJ *et al.* (2006) SOLÁRA *et al.* (2001) a REINPRECHTA *et al.* (1999). Následkom rozkladu termicky najlabilnejších zložiek pri termickej modifikácii sa znížilo množstvo prchavých rozkladných produktov uvoľnených v okamihu iniciácie a teda aj množstvo tepla uvoľneného v okamihu iniciácie. Skutočnosť, že maximálna rýchlosť uvoľňovania tepla bola zaznamenaná v krátkom časovom intervale po iniciácii skúmaných materiálov vyplýva zo spôsobu termického rozkladu drevných materiálov. Uvedené materiály vykazujú v podmienkach požiaru tvorbu zuhoľnatenej vrstvy, ktorá znižuje rýchlosť ich ďalšieho prehrievania externým tepelným tokom a tým aj rýchlosť ich termického rozkladu, tvorby plyných rozkladných produktov a rýchlosť uvoľňovania tepla. Problematiku vzniku zuhoľnatenej vrstvy za podmienok požiaru a jej vplyv na proces horenia bližšie popisujú KAČÍKOVÁ a MAKOVICKÁ-OSVALDOVÁ (2009). Získané údaje sú plne v súlade s výsledkami vedeckých prác PARKERA (2009) a TRANA (2009). Podobne začiatok žeravenia termicky modifikovaných vzoriek v kratšom časovom intervale od termického zaťaženia vzoriek v porovnaní s termicky nemodifikovanými vzorkami bol spôsobený poklesom obsahu prchavej horľaviny (a súčasným nárastom obsahu uhlíka) v termiky modifikovaných vzorkách.

Exaktné posúdenie vplyvu termickej modifikácie smrekového dreva na rýchlosť uvoľňovania tepla je možné až na základe priemernej rýchlosti uvoľňovania tepla. Vplyv hustoty externého tepelného toku a spôsobu termickej modifikácie smrekového dreva na jeho priemernú rýchlosť uvoľňovania tepla počas 30 minút ilustruje obr. 3.



Obr. 3 Vplyv hustoty tepelného toku a termickej modifikácie smrekového dreva na priemernú rýchlosť uvoľňovania tepla.

Fig. 3 Influence of external heat flux and thermal modification of spruce wood on average heat release rate.

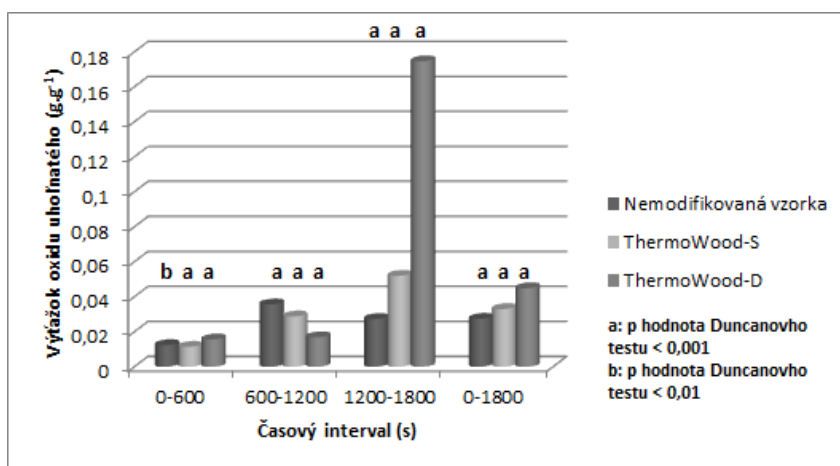
Uvedené výsledky naznačujú, že pri hustote externého tepelného toku $15 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ má termická modifikácia smrekového dreva významný vplyv na pokles priemernej rýchlosti uvoľňovania tepla. Tento efekt môže byť opäť vysvetlený znížením obsahu termicky najlabilnejších zložiek smrekového dreva počas termickej modifikácie, ktoré sa významne podieľajú na celkovom uvoľnenom teple vo fáze iniciácie (a tesne po nej) drevných materiálov. Naopak pri hustote externého tepelného toku $20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ je už uvedený vplyv takmer zanedbateľný. Tento efekt je možné vysvetliť tak, že pri vyššej hustote tepelného toku sa už podstatná časť tepla uvoľnila aj za podmienok bezplameňového horenia (žeravenia) vzoriek, teda priemerná rýchlosť uvoľňovania tepla nebola význame ovplyvnená horením plyných rozkladných produktov v iniciačnej fáze.

Pre komplexné posúdenie vplyvu termickej modifikácie smrekového dreva na jeho požiarne riziko bol stanovený aj jej vplyv na výťažok oxidu uhoľnatého. Výťažok oxidu uhoľnatého je definovaný ako podiel hmotnosti uvoľneného oxidu uhoľnatého k úbytku hmotnosti vzorky (podobné myšlienky uvádzajú napr. KARLSSON a QUINTIERE 2000). Uvedený prístup je vhodný v oblasti chémie horenia pri porovnaní materiálov z hľadiska účinnosti horenia, resp. posúdenie účinnosti horenia. Praktickejšie využitie v požiarnej inžinierstve má však výťažok oxidu uhoľnatého definovaný ako podiel vzniknutého oxidu uhoľnatého k pôvodnej hmotnosti vzorky. Tento prístup umožňuje rýchly orientačný výpočet hmotnosti vzniknutého oxidu uhoľnatého za podmienok požiaru vynásobeným výťažku oxidu uhoľnatého pôvodnou hmotnosťou materiálu. Uvedený prístup v sebe zahŕňa vplyv úbytku hmotnosti materiálu na celkový výťažok oxidu uhoľnatého. V ďalšej časti budú využité oba prístupy.

Vplyv termickej modifikácie smrekového dreva na výťažok oxidu uhoľnatého (výťažok na úbytok hmotnosti vzorky) je znázornený na obr. 4 a 5. Vplyv termickej modifikácie na výťažok oxidu uhoľnatého (výťažok na pôvodnú hmotnosť vzorky) ilustrujú obrázky 6 a 7. Pre porovnanie správania sa skúmaných materiálov v jednotlivých fázach rozvoja požiaru, sú na obr. 4 až 7 okrem celkového výťažku oxidu uhoľnatého počas 30 minút, uvedené aj čiastkové výťažky v časových intervaloch (0 až 600 s), (600 až 1200 s) a (1200 až 1800 s). Na obr. 6 a 7, je celkový výťažok (v časovom intervale 0 až 1800 s) súčtom výťažkov v jednotlivých časových intervaloch (nakoľko je výťažok vzťahovaný na pôvodnú hmotnosť vzorky). Zatiaľ čo na obr. 4 a 5 celkový výťažok nie je jednoduchým súčtom výťažkov v jednotlivých časových intervaloch. Tento fakt vychádza

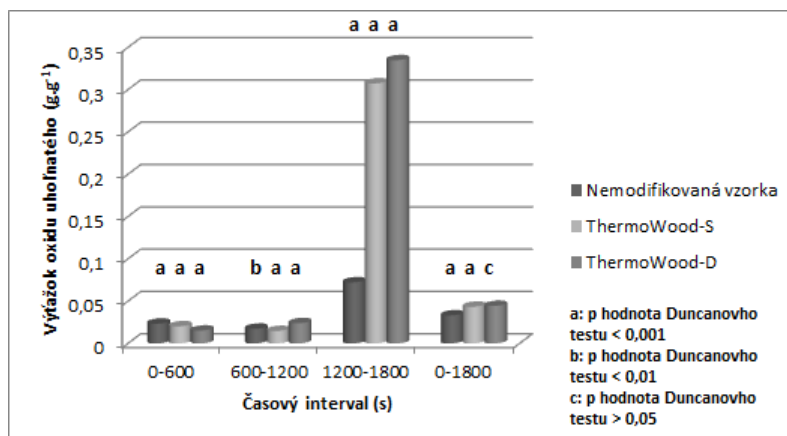
zo spôsobu prepočtu výťažku (na jednotku úbytku hmotnosti vzorky), pri ktorom aj relatívne malé množstvo vzniknutého oxidu uhoľnatého vo vybranom časovom intervale môže za predpokladu malého úbytku hmotnosti vzorky (bezplameňové horenie – žeravenie) vykázat relatívne vysoký výťažok. Tento vysoký výťažok (vo vybranom časovom intervale) sa však vplyvom nízkeho úbytku hmotnosti vzorky nemusí vo významnej miere premietnuť do nárastu celkového výťažku.

Na základe údajov prezentovaných na obr. 4 a 5, je možné vyvodiť závery predovšetkým o dokonalosti horenia posudzovaných materiálov. Z uvedených údajov vyplýva, že predovšetkým vo fáze bezplameňového horenia (žeravenia), resp. kombinácie plameňového horenia a žeravenia vykazuje termicky modifikované smrekové drevo nízku účinnosť horenia, pričom nedokonalosť horenia narastá so zvyšujúcou sa hustotou tepelného toku. Tento efekt môže byť vysvetlený skutočnosťou, že v termicky modifikovanom dreve sa zvyšuje pomer množstva uhlíka k množstvu vodíka. Podľa BALOGA (1999) je rýchlosť horenia zmesi oxidu uhoľnatého s kyslíkom monotónnou funkciou koncentrácie vodíka alebo vodík obsahujúcich zlúčenín. Preto sa najviac oxidu uhoľnatého uvoľňuje pri bezplameňovom horení (žeravení) tuhého uhlíkového zvyšku. Pri horení za podmienok požiaru, počas skúšky na kónickom kalorimetri, ako aj pri priemyselnom spaľovní však môže nastať súčasne plameňové aj bezplameňové horenie (žeravenie) drevných materiálov. Maximálny výťažok oxidu uhoľnatého bol zaznamenaný práve za podmienok súčasného plameňového a bezplameňového horenia (časť vzorky horela žeravením a časť plameňom).



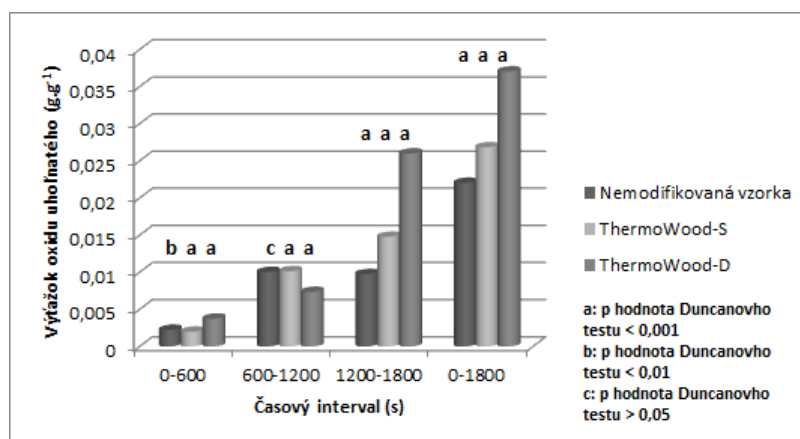
Obr. 4 Výťažok CO (vzťahnutý na úbytok hmotnosti vzorky) z termicky modifikovaného a nemodifikovaného smrekového dreva zaťaženého externým tepelným tokom $15 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Fig. 4 Yield of CO (related to specimen mass loss) from thermally modified and unmodified spruce wood loaded by $15 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ heat flux.



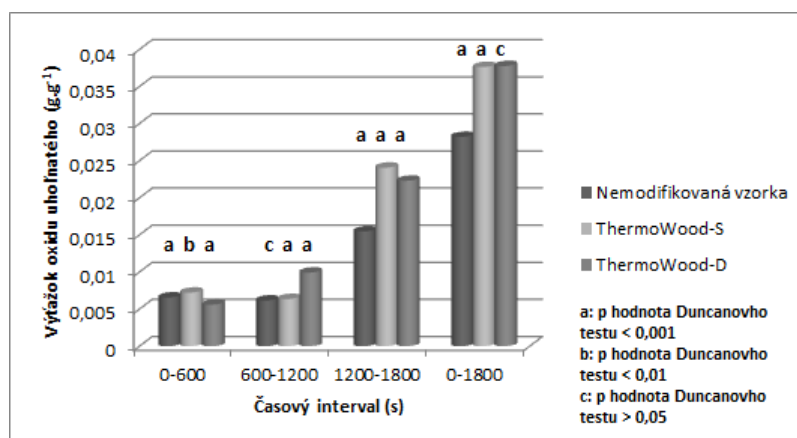
Obr. 5 Výťažok CO (vzťahnutý na úbytok hmotnosti vzorky) z termicky modifikovaného a nemodifikovaného smrekového dreva zaťaženého externým tepelným tokom $20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Fig. 5 Yield of CO (related to specimen mass loss) from thermally modified and unmodified spruce wood loaded by $20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ heat flux.



Obr. 6 Výťažok CO (vzťahnutý na pôvodnú hmotnosť vzorky) z termicky modifikovaného a nemodifikovaného smrekového dreva zaťaženého externým tepelným tokom $15 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Fig. 6 Yield of CO (related to original specimen mass) from thermally modified and unmodified spruce wood loaded by $15 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ heat flux.



Obr. 7 Výťažok CO (vzťahnutý na pôvodnú hmotnosť vzorky) z termicky modifikovaného a nemodifikovaného smrekového dreva zaťaženého externým tepelným tokom $20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Fig. 7 Yield of CO (related to original specimen mass) from thermally modified and unmodified spruce wood loaded by $20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ heat flux.

Výtťažky oxidu uhoľnatého na obr. 6 a 7 (vzťahnuté na jednotku hmotnosti pôvodnej vzorky) sú relatívnym vyjadrením množstva vznikajúceho oxidu uhoľnatého. Dané údaje dokazujú, že najviac oxidu uhoľnatého za podmienok skúšky na kónickom kalorimetri vzniká v poslednej fáze termického rozkladu (horenia) drevných materiálov. Tento záver však platí len pre nami skúmané podmienky. Pri horení vzoriek s relatívne nízkou hmotnosťou (rádovo jednotky g), zaťažených vysokou hustotou externého tepelného toku, môže proces plameňového a bezplameňového horenia splynúť do tej miery, že maximálna produkcia oxidu uhoľnatého bude zaznamenaná v iniciačnej fáze procesu horenia, tak ako to dokazujú výsledky práce MARTINKU *et al.* (2012a, 2012b).

Získané údaje o výtťažku oxidu uhoľnatého (vzťahnutého na jednotku pôvodnej hmotnosti vzorky) umožňujú výpočet celkového množstva oxidu uhoľnatého a jeho koncentráciu v požiarnom úseku. Túto problematiku podrobne popisujú OSVALD a MÓZER (2012).

Výtťažok oxidu uhoľnatého bol pre termicky modifikované aj nemoifikované vzorky relatívne vysoký (rádovo stotiny g na úbytok hmotnosti vzorky). Pre porovnanie TEWARSON (1995) uvádza výtťažok oxidu uhoľnatého pri horení za dostatočného prístupu vzduchu 0,005 g/g a pri horení za nedostatočného prístupu vzduchu 0,14 g/g. Z makroskopického hľadiska prebiehalo (v podmienkach skúšky) horenie za podmienok dostatočného prívodu vzduchu (prívod vzduchu bol približne $24 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, pre porovnanie na dokonalé spálenie jedného gramu dreva je potrebné približne $4,53 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$). Vyššiu hodnotu výtťažku oxidu uhoľnatého v porovnaní s citovaným autorom je možné vysvetliť faktom, že $24 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ bol objem vzduchu odsávaný digestorom, ale na horenie bola k dispozícii len jeho časť prúdiaca v tesnej blízkosti vzorky (horenie mohlo teda prebiehať v prechodnej oblasti medzi dostatočným a nedostatočným prístupom vzduchu). Vysoký výtťažok oxidu uhoľnatého bol spôsobený aj nízkou absolútnou vlhkosťou vzorky (6 %). Podľa LADOMERSKÉHO *et al.* (1993) je totiž pre zabezpečenie dokonalého horenia potrebná určitá optimálna vlhkosť drevej vzorky (dokonalé horenie neprebíha pokiaľ má vzorka príliš nízky alebo naopak príliš vysoký obsah vlhkosti). Pri spaľovaní odpadov biomasy alebo priemyselných drevných odpadov je treba zohľadňovať ďalšie vplyvy (LADOMERSKÝ 2000, LADOMERSKÝ *et al.* 2003). Podobný záver uvádza aj BALOG (1999) podľa ktorého je rýchlosť horenia zmesi oxidu uhoľnatého s kyslíkom monotónnou funkciou koncentrácie vodíka alebo vodík obsahujúcich zlúčenín (napr. vody).

ZÁVER

V predloženom článku bolo posúdené požiarne riziko smrekového dreva termicky modifikovaného v atmosfére čistého vzduchu teplotným programom ThermoWood – Thermo-S (maximálna teplota počas termickej modifikácie $190 \text{ }^\circ\text{C}$) a ThermoWood – Thermo-D (maximálna teplota počas termickej modifikácie $212 \text{ }^\circ\text{C}$). Posúdenie požiarneho rizika bolo realizované na základe stanovenia a porovnania priemernej a maximálnej rýchlosti uvoľňovania tepla a výtťažkov oxidu uhoľnatého (v prepočte na úbytok hmotnosti a pôvodnú hmotnosť vzorky) termicky modifikovaných a nemoifikovaných vzoriek.

Termicky modifikované smrekové drevo vykazuje nižšiu maximálnu, ako aj priemernú rýchlosť uvoľňovania tepla v porovnaní s termicky nemoifikovanými vzorkami.

Prezentované výsledky naznačujú, že vplyv termickej modifikácie na pokles priemernej rýchlosti uvoľňovania tepla klesá s narastajúcou hustotou externého tepelného toku. Ďalší výskum v uvedenej oblasti by sa mal zamerať na jednoznačné potvrdenie tejto hypotézy.

Termická modifikácia smrekového dreva má len zanedbateľný vplyv na výťažok oxidu uhoľnatého v časovom intervale 0 až 600 s od začiatku termického zaťaženia vzorky externým tepelným tokom, čo zodpovedá iniciácii skúmaných materiálov a ich plameňovému horeniu (pri určitom zjednodušení simuluje prvú fázu rozvoja požiaru).

Termická modifikácia spôsobila významný nárast celkového výťažku oxidu uhoľnatého v časovom intervale 1200 až 1800 s, kedy termický rozklad prebiehal predovšetkým bezplameňovým spôsobom a pri určitom zjednodušení simuluje fázu dohorievajúceho požiaru.

Na základe výsledkov prezentovaných LADOMERSKÝM *et al.* (1993) je možné predpokladať, že na zvýšenie účinnosti horenia termicky modifikovaného dreva (pokles výťažku produktov nedokonalého horenia) pri priemyselnom spaľovaní, bude potrebné zabezpečiť optimálnu vlhkosť vzoriek (paliva), ktorá bude vyššia v porovnaní s termicky nemodifikovanými vzorkami. Ďalší výskum v oblasti priemyselného spaľovania termicky modifikovaného dreva (napr. energetické zhodnocovanie odpadov z uvedeného materiálu) by sa mal zamerať na stanovenie uvedenej optimálnej vlhkosti.

LITERATÚRA

- BABRAUSKAS V., PEACOCK R. D. 1992. Heat release rate : the single most important variable in fire hazard. *Fire Safety Journal*, 1992, 18(3): 255–272.
- BALOG K. 1999. Samovznietenie. Ostrava: SPBI. 1999. 133 s. ISBN 80-86111-43-1.
- BOONSTRA M. J., TJEERDSMA B. 2006. Chemical analysis of heat treated softwoods. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2006, 64(3): 204–211.
- CANDELIER K., DUMARÇAY S., PÉTRISSANS A., DESHARNAIS L., GÉRARDIN P., PÉTRISSANS M. 2013. Comparison of chemical composition and decay durability of heat treated wood under different inert atmospheres: Nitrogen or vacuum. *Polymer Degradation and Stability*, 2013, 98(2): 677–681.
- DZURENDA L., DELIISKY N. 2012. Sušenie bukového reziva v komorových sušiarňach režimami zachovávajúcimi pôvodnú farbu dreva. In *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 2012, 54(1): 33–42.
- ESTEVEZ B., VEIDEIRA R., PEREIRA H. 2011. Chemistry and ecotoxicity of heat-treated pine wood extractives. *Wood Science and Technology*, 2011, 45(4): 661–676.
- GONZÁLES-PEÑA M., CURLING S. F., HALE M. D. D. 2009. On the effect of heat on the chemical composition and dimensions of thermally-modified wood. *Polymer Degradation and Stability*, 2009, 94(12): 2184–2193.
- HUANG X., KOCAEFE D., KOCAEFE Y., BOLUK Y., PICHETTE A. 2012. Study of the degradation behavior of heat-treated jack pine (*Pinus banksiana*) under artificial sunlight irradiation. *Polymer Degradation and Stability*, 2012, 97(7): 1197–1214.
- KAČÍK F., VEJKOVÁ V., ŠMÍRA P., NASSWETROVÁ A., KAČÍKOVÁ D., REINPRECHT L. 2012. Release of terpenes from fir wood during its long-term use and in thermal treatment. *Molecules*, 2012, 17(8): 9990–9999.
- KAČÍKOVÁ D., KAČÍK F. 2009. Vplyv termického pôsobenia na zmenu lignínu smrekového dreva. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 2009, 51(2): 71–78.
- KAČÍKOVÁ D., MAKOVICKÁ-OSVALDOVÁ L. 2009. Rýchlosť odhorievania dreva z rôznych častí stromu vybraných ihličnatých drevín. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 2009, 51(1): 27–32.
- KAČÍKOVÁ D., NETOPILOVÁ M., OSVALD A. 2006. Drevo a jeho termická degradácia. Ostrava: SPBI, 2006. 79 s. ISBN 80-86634-78-7.
- KAMDEM D. P., PIZZI A., TRIBOULOT M. C. 2000. Heat-treated timber: potentially toxic byproducts presence and extent of cell wall degradation. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2000, 60(1): 1–6.
- KARLSSON B., QUINTIERE J. G. 2000. Enclosure fire dynamics. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. 336 p. ISBN 0-8493-1300-7.

- KUČEROVÁ V., KAČÍKOVÁ D., KAČÍK F. 2011. Zmeny extraktívnych látok a makromolekulových charakteristík celulózy po termickej degradácii smrekového dreva. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 2011, 53(2): 77–83.
- LADOMERSKÝ J. 2000. Emission analysis and minimization from the wood waste combustion. *Wood Research*, 2000, 45(4): 33–44.
- LADOMERSKÝ J., DZURENDA L., PAJTÍK J., LONGAUER J. 1993. Spaľovanie drevného odpadu z ekologického a energetického hľadiska. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 1993. 68 s. ISBN 80-228-0285-9.
- LADOMERSKÝ J., HRONCOVÁ E., SAMEŠOVÁ D. 2003. Investigation of appropriate conditions for wood wastes combustion on basis of emission. *Drewno*, 2003, 46(170): 90–98.
- MARTINKA J., KAČÍKOVÁ D., HRONCOVÁ E., LADOMERSKÝ J. 2012a. Experimental determination of the effect of temperature and oxygen concentration on the production of birch wood main fire emissions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2012, 110(1): 193–198.
- MARTINKA J., BALOG K., CHREBET T., HRONCOVÁ E., DIBDIAKOVÁ J. 2012b. Effect of oxygen concentration and temperature on ignition time of polypropylene. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2012, 110(1): 485–487.
- OSVALD A., MÓZER V. 2012. Požiarne inžinierstvo ako metóda navrhovania požiarnej bezpečnosti. In *Advances in fire and safety engineering*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2012, 211–223.
- PARKER W. J. 2009. Prediction of the heat release rate from basic measurements. In *Heat release in fires*. Greenwich : Interscience communications, 2009, p. 333–356.
- REINPRECHT L. 1996. TCMTB and organotin fungicides for wood preservation - efficacy, ageing, and applicability. Zvolen: Technical University in Zvolen, 1996. 65 p. ISBN 80-228-0566-1.
- REINPRECHT L., KAČÍK F., SOLÁR R. 1999. Relationship between the molecular structure and bending properties of the chemically and thermally degraded maplewood: part 1: decrease of bending properties compared with changes in the basic chemical composition of wood. *Cellulose Chemistry and Technology*, 1999, 33(1–2): 67–79.
- REINPRECHT L., VIDHOLDOVÁ Z. 2011. *Termodrevo*. Ostrava : Šmíra-print, 2011. 89 p. ISBN 978-80-87427-05-7.
- SOLÁR R., KAČÍK F., REINPRECHT L. 2001. Relationship between the molecular structure and bending properties of chemically and thermally degraded maple wood: II. comparison of bending properties decrease with structural characteristics of polysaccharides. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2001, 35(1–2): 151–164.
- TEWARSON A. 1995. Generation of heat and chemical compounds in fire. In *SFPE Handbook of fire protection engineering*. Massachusetts: National Fire Protection Association, 1995, pp. 82–161.
- THERMOWOOD ASSOCIATION. 2003. *ThermoWood handbook*. Helsinki: Finish ThermoWood Association, 2003. 66 p.
- TRAN H. C. 2009. Experimental data on wood materials. In *Heat release in fires*. Greenwich: Interscience communications, 2009, p. 357–372.
- WANG J., COOPER P. A. 2007. Fire, flame resistance and thermal properties of oil thermally-treated wood. Stockholm : The international research group on wood protection, 2007, 10 p.
- WEILAND J. J., GUYONNET R. 2003. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2003, 61(3): 216–220.
- ZACHAR M., MITTEROVÁ I., XU Q., MAJLINGOVÁ A., CONG J., GALLA Š. 2012. Determination of fire and burning properties of spruce wood. *Drvna industrija*, 2012, 63(3): 217–223.
- ISO 5660-1:2002, Reaction to fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method).
- STN 13501-2:2005, Klasifikácia požiarных charakteristík stavebných výrobkov a prvkov stavieb. Časť 2: Klasifikácia využívajúca údaje zo skúšok požiarnej odolnosti (okrem ventilačných zariadení). Bratislava : Slovenský ústav technickej normalizácie, 2005. nestránkovaná.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0353-11 " Návrh a realizácia pilotnej retorty so zníženými emisiami na výrobu biouhlia pre marginálne zóny a overovacie aplikácie“. Tento článok vznikol rovnako vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt: CE pre vývoj a aplikáciu diagnostických metód pri spracovaní kovových a nekovových materiálov, ITMS: 26220120048, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja. Tento článok vznikol rovnako vďaka finančnej podpore agentúry KEGA MŠVVaŠ SR, pre projekt č. 002STU-4/2013: Vybudovanie výučbového laboratória pre rekonštrukciu požiarov v laboratórnej mierke.

Adresa autorov

Ing. Jozef Martinka, PhD.

Ing. Tomáš Chrebet, PhD.

Prof. Ing. Karol Balog, PhD.

Slovenská technická univerzita v Bratislave

Materiálovo-technologická fakulta so sídlom v Trnave

Ústav bezpečnostného a environmentálneho inžinierstva

Paulínska 16,

917 24 Trnava

Slovenská republika

jozef.martinka@stuba.sk

tomas.chrebet@stuba.sk

karol.balog@stuba.sk

Ing. Emília Hroncová, PhD.

Technická univerzita vo Zvolene

Fakulta ekológie a environmentalistiky

Katedra environmentálneho inžinierstva

T.G. Masaryka 24

960 53 Zvolen

Slovenská republika

emilia.hroncova@tuzvo.sk