

## TEPLOTNÉ POLIA PRI MIKROVLNNEJ STERILIZÁCI DREVA

### TEMPERATURE FIELDS AT MICROWAVE STERILIZATION OF WOOD

Ivan Makovíny – Ladislav Reinprecht – Pavel Šmíra  
– Ľubomír Pavlík – Monika Terebesyová

#### ABSTRACT

Homogeneity of temperature fields is a very important factor at the microwave (MW) sterilization of wooden elements. MW device (with magnetron, horn antenna, timer and other components) was used for heating: A/ short spruce prisms (200 × 80 × 80 mm); B/ model wooden beams (250 × 200 × 530 mm) conglomerated from 24 spruce boards. Temperature fields measured after 4, 8, 12, 16 or 20 minutes either in the inner parts of prisms with thermocouples or on the surfaces of individual boards with the thermal imaging camera FLIR B425 indicated that in the spruce wood (*Picea abies* Karst L.) the critical sterilization temperatures 60–90 °C can be achieved after 8–20 minutes in the depth of 70–250 mm from its surfaces.

**Key words:** wood, sterilization, microwave heating, temperature fields.

#### ÚVOD

##### Mikrovlnná sterilizácia dreva atakovaného biologickými škodcami

Mikrovlnná (MW) sterilizácia dreva sa využíva pri likvidácii rôznych vývinových štádií biologických škodcov, ako je drevokazný hmyz, drevokazné huby alebo drevosfarbujúce huby. Vplyvom zvýšenej teploty vytvorenej v dreve účinkom mikrovlnného žiarenia v oblasti 55 °C hynú larvy a vajíčka hmyzu, respektíve pri vyšších teplotách aj mycéliá a spóry húb (MORELL 1995, SUTTER 2002).

Princípom každej hypertermickej sterilizačnej metódy – metódy zvýšenia teploty nad kritickú hranicu života organizmu – je časovo dostatočne dlhý účinok takej kritickej teploty na materiál (t.j. aj na drevo), ktorá je vyššia ako kritická minimálna teplota nevhodná pre existenciu konkrétneho biologického škodcu. Účinnosť hypertermickej sterilizačnej metódy závisí od správnej identifikácie druhu biologického škodcu a využitia poznatkov o kritickej (letálnej) teplote a nutnom čase jej trvania. Na usmrtenie drevokazného hmyzu sa vyžaduje teplota 50 až 60 °C pôsobiaca po dobu 30 až 60 minút, avšak pri vyšších teplotách sa hmyz likviduje skôr (REINPRECHT 2008). Letálne teploty potrebné na usmrtenie mycélií drevokazných húb sú podstatne vyššie (zvyčajne nad 80 °C), pri pôsobení niekoľko desiatok minút až hodín. Niektoré drevokazné huby z rodu *Gloeophyllum* dokážu v dreve prežiť teploty aj nad 95 °C počas 4 hodín (SCHMIDT 2007). Naopak, na vyššie teploty je náchylná známa domová drevokazná huba drevomorka domáca – *Serpula lacrymans*, ktorej teplotné optimá v porovnaní s ostatnými drevokaznými hubami sú nižšie v oblasti 18 až 20 °C, a rovnako aj jej letálne teploty sa pohybuje v nižšom rozmedzí 55 až 65 °C (STEINFURTH 2007).

Z pohľadu účinnosti sterilizácie dreva ohrevom, ktorý možno realizovať teplo-vzdušnou technikou (ŠMÍRA 2010), mikrovlnnou technikou (TEREBESYOVÁ *et al.* 2010, MAKOVÍNY *et al.* 2011), infračervenou technikou, ale aj inak, je veľmi dôležitá otázka homogénnosti teplotných polí v priereze sterilizovaného dreveného objektu, t.j. konštrukčného prvku – krokva, väzný trám, rám dverí, apod., respektíve drevenej plastiky, apod.

### **Fyzikálny princíp sterilizácie dreva mikrovlnným ohrevom**

Mikrovlnný (MW) ohrev predstavuje jednu z najrýchlejších a najúčinnějších fyzikálnych metód sterilizácie drevárskych výrobkov. Jeho výhodou je, že teplo sa tvorí v celom objeme dreva absorpciou energie elektromagnetického poľa, zvyčajne nezávisle od jeho tepelno-technických vlastností.

Princíp pôsobenia mikrovln na drevné materiály spočíva v tom, že v týchto materiáloch zložených z polárnych látok ako je voda, celulóza a hemicelulózy i zo semipolárnych látok ako je lignín prebieha v prítomnosti elektromagnetického poľa polarizačný proces, dôsledkom ktorého sa tvorí teplo. Pri aplikácii MW ohrevu je teplotné pole v ožarovanom objekte, napr. v drevenom tráme, nehomogénne, a to ako po priereze tak aj na ploche. Základný rozdiel v teplotných poliach (rozložení teploty) závisí od toho, či ohrev prebieha v rezonátorovej komore alebo prostredníctvom aplikátora - antény. Z praktického hľadiska je potrebné, aby sa ohrev s použitím elektromagnetického žiarenia dal realizovať v podmienkach drevených stavieb pomocou prenosných mikrovlnných systémov – pomocou antén. Vzhľadom na plánované širšie použitie mikrovlnnej metódy v praxi sme takýto prenosný systém navrhli a následne sme sa venovali štúdiu jednostranného MW ohrevu modelových drevených prvkov s použitím lievikovvej antény.

Všeobecne platí, že antény pre MW ohrev majú svoje vyžarovacie charakteristiky, ktoré sa dajú dobre definovať pri vyžarovaní energie anténami do voľného priestoru. Napríklad vyžarovacia charakteristika lievikovvej antény je nehomogénna. Avšak, ak sa lievikovou anténou ožaruje konkrétny objekt – drevený predmet alebo konštrukčný prvok, tak ani definovanú nehomogénnu vyžarovaciu charakteristiku antény stanovenú na referenčnom objekte nemožno úplne zaistiť a rozloženie elektromagnetického poľa závisí aj od ďalších činiteľov. K týmto činiteľom patrí najmä geometrický tvar a rozmery ožarovaného objektu, ako aj jeho dielektrické vlastnosti, ktoré sa u dreva menia s vlhkosťou a teplotou. Dôležitým činiteľom je aj vzdialenosť antény od ožarovaného objektu. V danom dôsledku je teplota v ohrievanom dreve rozložená nerovnomerné, respektíve lepšie povedané teplotné pole má vždy inú nehomogenitu, a to nielen po priereze ale aj v jednotlivých vrstvách dreva. Okrem toho, v praxi je nerovnomernosť mikrovlnného ohrevu drevených objektov význame ovplyvňovaná nie len nerovnomernou vlhkosťou dreva, ale aj hrčami, reakčným drevom, kľincami, kovaniami, apod.

Pre docielenie účinnej sterilizácie dreva je vždy dôležité vytvoriť v drevenom objekte také teplotné pole, ktoré spĺňa požiadavku na dosiahnutie minimálnej kritickej teploty a tiež potrebný čas jej trvania. Tento problém sa musí riešiť individuálne pre ten ktorý objekt (druh, hustota, kvalita, rozmery a vlhkosť dreva, kovania, apod.). Poznatky z viacerých konkrétnych štúdií teplotných polí by sa však napriek tomu mohli stať podkladom pre všeobecnejšie platné formulácie tvorby teplotných polí v rôznych drevených objektoch pri ich MW ohreve, o čo sa pokúša aj táto experimentálna práca.

### **Fyzikálna charakteristika ohrievacieho výkonu pri MW ohreve**

V prvom priblížení možno predpokladať, že pri mikrovlnnom ohreve dreva sa uplatňuje absorpčný zákon a teplota v smere od ožarovaného povrchu dreva do jeho vnútra klesá. Najjednoduchší prípad ohrevu dostatočne hrubej a rozľahlej dielektrickej dosky, všeobecne „polpriestoru“, je rovinnou elektromagnetickou vlnou, ktorej energia sa v dielektriku absorbuje. Intenzita elektromagnetického poľa so vzdialenosťou  $x$  od povrchu dielektrika má vtedy exponenciálny pokles (ZIELONKA & GIERLIK 1999) a platí vzťah (1):

$$E(x) = E_0 \cdot e^{-\beta \cdot x} \quad (1)$$

kde:  $E_0$  – intenzita poľa na povrchu dielektrika ( $x=0$ ),  
 $\beta$  – merný útlm vlnenia.

Člen  $e^{-\beta \cdot x}$  vyjadruje utlmovanie elektromagnetickej vlny. Parameter  $\beta$  závisí od dielektrických parametrov prostredia, t.j. permitivity a stratového čísla. Pri dreve sú tieto charakteristiky závislé najmä od vlhkosti, teploty a anatomického smeru.

Merný objemový ohrievací výkon sa vypočíta zo vzťahu (2):

$$p = 2\pi f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' E^2 \quad (2)$$

kde:  $f$  – frekvencia,  
 $\varepsilon_0$  – permitivita vákuua,  
 $\varepsilon''$  – stratové číslo,  
 $E$  – efektívna hodnota intenzity elektrického poľa.

Pre rozloženie merného ohrievacieho výkonu v smere šírenia elektromagnetickej vlny pri MW ohreve platí vzťah (3):

$$p = p_0 \cdot \varepsilon^{-2\beta x} \quad (3)$$

kde:  $p_0$  – hustota ohrievacieho výkonu na povrchu dielektrika (dreva).

Z tohto vzťahu vyplýva že teoreticky najväčšia intenzita ohrevu by mala byť na povrchu dielektrika – ohrievanej hrubej dosky. Exaktné riešenie priebehu teploty po priereze dosky za viacerých zjednodušujúcich predpokladov, a len pre krátky čas ohrevu, uvádzajú ZIELONKA & GIERLIK (1999). Teoretické riešenie teplotného poľa si aj pre relatívne jednoduchý prípad „jednostranného mikrovlnného ohrevu“ vyžaduje hlbšie poznať fyzikálne charakteristiky materiálu – dreva, z ktorých viaceré nebývajú vždy dostatočne známe. V praxi sa potom intenzita ohrevu môže líšiť od teoretických predpokladov, t.j. namerané teplotné polia nezodpovedajú teórii.

## MATERIÁL A METODIKA

Cieľom príspevku sú analýzy teplotných polí v dreve, ktoré sa vytvárajú pri použití mikrovlnného ohrevu v oblasti teplôt nutných pre sterilizačný proces.

### **Materiál**

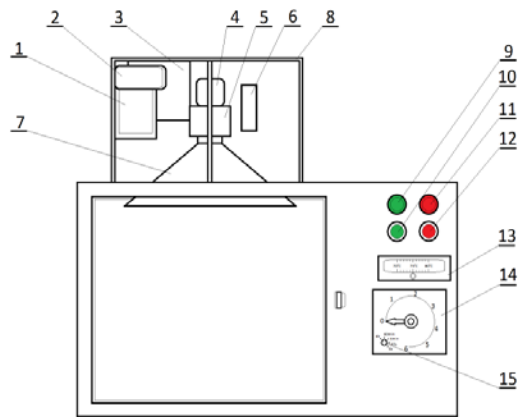
Teplotné polia pri MW sterilizačnom ohreve sa skúmali na dreve smreka obyčajného (*Picea abies* Karst. L.). Skúšobné telesá dvoch typov:

- krátke hranoly s rozmerom 200 × 80 × 80 mm (pozdĺž × radiálne × tangenciálne), t.j. pre experiment typu A (Obr. 2);
  - dosky s rozmermi 250 × 200 × 15 mm /resp. 40 i 50 mm/ (pozdĺž × šírka × hrúbka), t.j. pre experiment typu B (Obr. 3),
- sa pripravili tak, aby v nich neboli trhliny a hrče väčšie ako 12 mm, resp. vypadavé hrče.

### **Mikrovlnný systém**

K mikrovlnnému (MW) sterilizačnému ohrevu smrekového dreva sa navrhol a použil MW systém s lievikovou anténou. Tento systém umožňuje jednostranný ohrev drevného materiálu. Pozostáva z dvoch hlavných častí: – z tieniacej komory s vnútorným priestorom 400 mm × 600 mm × 550 mm; – zo zdroja MW žiarenia s lievikovou anténou, ktorej apertúra je 240 mm × 230 mm. Zdroj MW žiariča je v systéme umiestnený do vrchnej steny tieniacej komory. Tienenie sa zaisťuje tak, aby sa simulovali podmienky vyžarovania MW do voľného priestoru. Vnútorné steny komory sú v systéme obložené vysoko absorpčným (bezodrazovým) materiálom pre maximálnu absorpciu rozptylového MW poľa.

Zapojenie a skladba MW zdroja boli štandardné – magnetrón, lieviková anténa, napájací obvod, ochranné, spínacie a riadiace prvky. Anténa bola navrhnutá pre frekvenciu 2,45 GHz s využitím teórie podľa BELANISA (1997). Hustota MW ohrievacieho výkonu bola konštantná 1 W·cm<sup>-2</sup>. Použitý mikrovlnný systém je znázornený na Obr. 1.



**Obr. 1 Mikrovlnný (MW) systém použitý pri experimentoch. Opis MW zariadenia: 1 – Transformátor; 2 – Filtračný kondenzátor; 3 – Napájací obvod; 4 – Magnetron; 5 – Chladič magnetronu; 6 – Ventilátor; 7 – Lieviková anténa; 8 – Rám; 9 – Signalizácia zapnutia; 10 – Tlačidlo zapnutia; 11 – Signalizácia vypnutia; 12 – Tlačidlo vypnutia; 13 – Termostat; 14 – Časovač; 15 – Nastavenie časovača.**

**Fig. 1 Device for microwave (MW) heating. Description of the MW device: 1 – Transformer; 2 – Filter condenser; 3 – Supply circuit; 4 – Magnetron; 5 – Magnetron cooler; 6 – Fan; 7 – Horn antenna; 8 – Frame; 9 – Switch-on indication; 10 – ON button; 11 – Switch-off indication; 12 – OFF button; 13 – Thermostat; 14 – Timer; 15 – Timer setting.**

#### **Meracie zariadenia pre zistenie teplotných polí a hraničných teplôt**

Na zisťovanie teplotného poľa a hraničných teplôt (maximálnej, minimálnej, priemernej) bola použitá termovízna kamera FLIR B425. Základné parametre použitej termovíznej kamery: - rozlíšenie 50 mK; - IČ snímok s  $320 \times 240$  pixelov; - rozsah teplôt od  $-20$  do  $+350$  °C. Táto infračervená kamera dovoľuje, aby sa okrem zobrazenia celkového teplotného poľa zmerali aj teploty vo zvolených miestach, a aby sa súčasne zistili aj max. a min. teploty vo zvolenej oblasti teplotného poľa. Teplota sa v experimentoch merala aj pyrometerom GIM 530 MS s presnosťou merania  $\pm 0,7$  °C, a tiež termočlánkovými teplomermi s príslušným meracím obvodom.

Pri aplikácii termovíznej kamery sme neodčítavali každú nameranú hodnotu teploty na povrchu dreveného materiálu, ale použili sme softvér FLIR Quick Report dodávaný s kamerou. Táto aplikácia nám umožňovala preskúmať termovízny snímok a upraviť také parametre, ako je rozsah zobrazovaných teplôt, farebná paleta, apod. Dôležitá je aj skutočnosť, že sme dodatočne mohli upraviť parametre prostredia (odrazená teplota, atmosférická teplota, relatívna vlhkosť vzduchu, vzdialenosť snímania), a čo je najpodstatnejšie, upraviť sme mohli aj emisivitu pre skúmaný materiál – smrekové drevo. Týmito úkonmi sme dokázali čo najpresnejšie spracovať výsledný snímok. Pre presnejšie spracovanie sme všetky hodnoty teplôt získané z termovíznej kamery exportovali do programu Excel a následne vytvorili grafy (Obr. 4.).

#### **Ciele mikrovlnného ohrevu telies smreka pri experimentoch typu A a B**

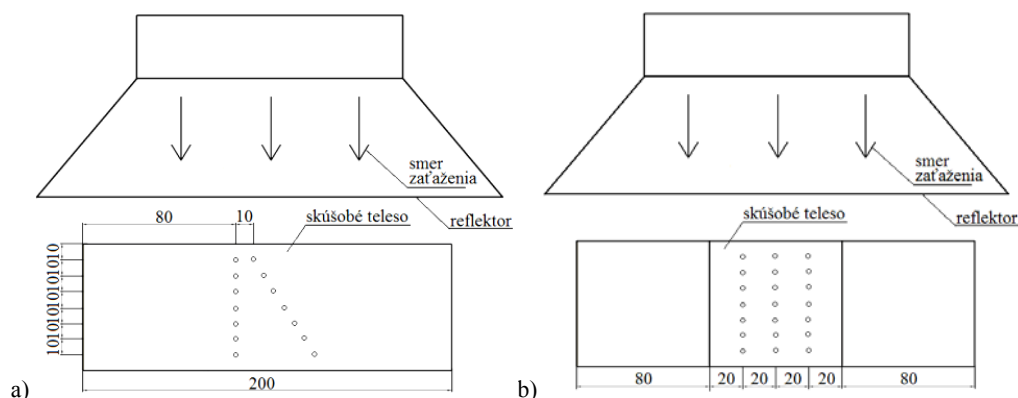
Cieľom experimentu typu A bolo zistiť rozloženie teplôt po priereze dreveného materiálu počas mikrovlnného ohrevu. Použili sa k tomu krátke hranoly ( $200 \times 80 \times 80$  mm), do ktorých sa navítali otvory o priemere 1,5 mm, do hĺbky 20 alebo 40 mm, vzdialené 10, 20, 30, 40, 50, 60 a 70 mm od ožarovaného povrchu (Obr. 2a). Do týchto hranolov sa urobili ďalšie vrty o priemere 1,5 mm, do hĺbky 20 mm, z jednej čelnej strany v troch líniah, vo vzdialenostiach 10, 20, 30, 40, 50 a 70 mm od ožarovaného povrchu (Obr. 2b). Do otvorov sa v definovaných časových fázach experimentu vkladali termočlánky na priebežné sledovanie teplôt. V tomto experimente sme sledovali aj vplyv vlhkosti dreva na proces ohrevu. Jedna skupina hranolov sa ožarovala v čerstvom stave pri vstupnej vlhkosti  $95 \pm 5$  %, zatiaľ čo druhá skupina hranolov sa pred ožarovaním presušila na vlhkosť  $10 \pm 1$  %.

Cieľom experimentu typu B bolo získať podrobnejšie informácie o rovnomernosti prieniku MW žiarenia do drevených prvkov väčších prierezov. Analyzoval sa prestup mikrovln do väčšej

vzdialenosti od povrchu dreva s cieľom overiť možnosti homogénnej sterilizácie aj objemnejších drevených objektov. Telesá doskového tvaru (250 × 200 mm, s hrúbkou 15, 40 alebo 50 mm), použité na vytvorenie drevených objektov s hrúbkou od 15 do 530 mm, sa pred experimentom presušili na vlhkosť  $10 \pm 1 \%$ .

#### Postup zistenia teplôt pri experimente typu A

Série pozostávajúce z troch smrekových hranolov  $200 \times 80 \times 80$  mm (3 ks s vlhkosťou  $95 \pm 5 \%$ , resp. 3 ks s vlhkosťou  $10 \pm 1 \%$ ) sa rovnomerne umiestnili do MW komory vzhľadom na os antény (Obr. 2). Hranoly sa následne vystavili MW žiareniu pri frekvencii 2,45 GHz po dobu 16 minút. Sledoval sa čas potrebný na dosiahnutie teploty v rozmedzí 60 až 100 °C v celom objeme hranolov. Teplota vnútri hranolov bola meraná termočlánkovými teplomermi v predvrtaných otvoroch a povrchové teploty boli zaznamenávané pomocou pyrometra GIM 530 MS (Obr. 4).

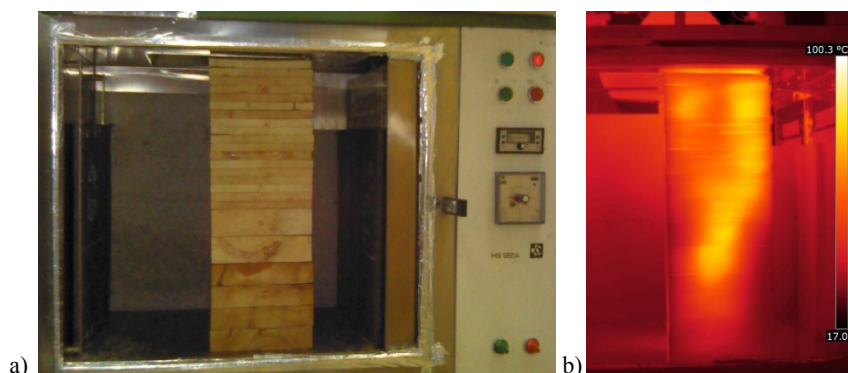


**Obr. 2** Schéma uloženia 3 krátkych hranolov  $200 \times 80 \times 80$  mm pri experimente typu A: a) pohľad od prednej strany MW komory, b) pohľad z boku MW komory na čelá hranolov. Poznámka: Na jednom z hranolov je znázornené umiestnenie vývrtov pre termočlánky.

**Fig. 2** Placement sketch of 3 short spruce prisms  $200 \times 80 \times 80$  mm at the trial of A type: a) view from the frontal side of the UW chamber, b) view from the lateral side of the UW chamber on the heads of prisms. Note: At one prism is shown localization of bores for thermocouples.

#### Postup zistenia teplôt pri experimente typu B

V druhej časti experimentov sa zo smrekových dosiek o rozmeroch  $250 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times$  hrúbka (hrúbka = 15, 40 alebo 50 mm) zostavil model dreveného trámu pre overenie prestupu mikrovlnného žiarenia do drevených prvkov s väčšími prierezmi. Analýza teplotných polí sa vykonala v definovaných hĺbkach modelového trámu od jeho povrchu. Modelový trám o rozmeroch  $250 \times 200 \times 530$  mm pozostával celkove z 18-tich dosiek o hrúbke 15 mm, 2 dosiek o hrúbke 50 mm a zo 4 dosiek o hrúbke 40 mm (Obr. 3). V MW systéme sa modelový drevený trám ohrieval nepretržite po dobu 20 minút (Obr. 3b). Po uplynutí tohto času sa MW systém samočinne vypol a následne sa zrealizovala séria termovízných snímkov z povrchu všetkých 24 dosiek tvoriacich modelový trám so zámerom zaznamenať výslednú teplotu, tvar teplotného poľa a hĺbku prieniku žiarenia do jednotlivých vrstiev dreveného trámu (Obr. 5 až 8).



**Obr. 3 Model dreveného trámu  $250 \times 200 \times 530$  mm z 24 dosiek smreka uložený do MW systému pri experimente typu B (a); ukážka rozloženia teplotných polí v tomto modeli (b).**

**Fig. 3 Model wooden beam  $250 \times 200 \times 530$  mm conglomerated from 24 spruce boards and embedded in MW system at the trial of B type (a); distribution of temperature fields (b).**

## VÝSLEDKY A DISKUSIA

### Zhodnotenie experimentu typu A

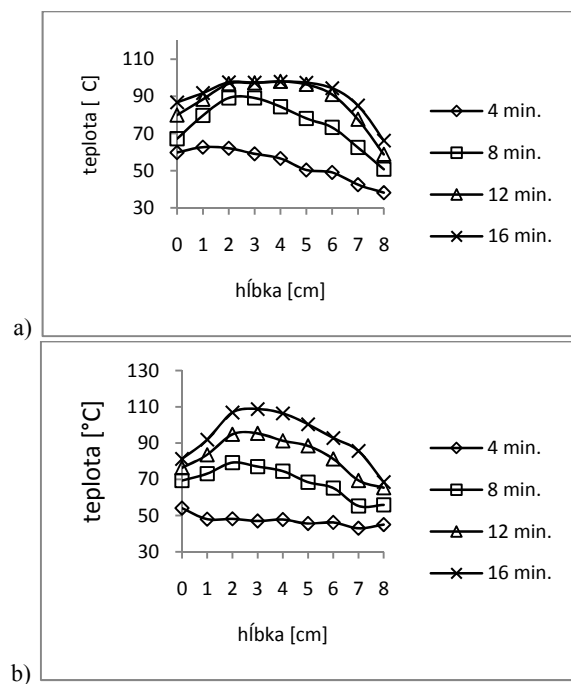
Teplotné profily zistené v experimente typu A (Obr. 2 – pre krátke smrekové hranoly  $200 \times 80 \times 80$  mm) reprezentujú vplyv dvoch rôznych vlhkostí dreva ( $w =$  cca 95 % a 10 %) na rýchlosť a homogénnosť MW ohrevu (Obr. 4). Teplota vnútorných vrstiev dreva sa v obidvoch situáciách znižovala s hĺbkou prieniku žiarenia. Teplota okrajových vrstiev dreva dosahovala zvyčajne nižšie hodnoty, čo možno zdôvodniť skutočnosťou, že už ohriate vrstvy dreva sa vplyvom nízkej teploty okolia ( $22 \pm 2$  °C) priebežne ochladzovali, zjavnejšie do hĺbky cca 20 mm zo všetkých povrchov. Prihliadnuc na efekt priebežného ochladzovania drevených hranolov počas MW ohrevu od povrchov sú experimentálne výsledky v súlade s teoretickou analýzou uvedenou v úvode (viď rovnica 1), t.j. „Poklesy absorpcie energie elektromagnetického poľa v smere od povrchu dreva do jeho hĺbky je možné definovať exponenciálnou závislosťou“.

Teplotné krivky smrekových hranolov pri ich vstupnej vlhkosti v oblasti cca 95 % nepresiahli hodnotu 100 °C, čo zodpovedá destilačnej horizontále – vyparovaniu až varu voľnej vody v dreve za atmosférického tlaku (Obr. 4a). Pri vstupnej 10 % vlhkosti hranolov (teoreticky i pri vlhkosti hranolov až do bodu nasýtenia vlákien) sa jav vyparovania a varu voľnej vody neuplatňuje, čo umožnilo, že maximálne teploty v dreve presiahli pri najdlhšom čase ohrevu trvajúcim 16 minút už aj hodnotu 100 °C (Obr. 4b).

Pri obidvoch vstupných vlhkostiach smrekových hranolov sa zistilo, že teplotné krivky dosiahli kritickú hodnotu 60 °C nutnú pre sterilizačnú likvidáciu drevokazného hmyzu v celej meranej hĺbke hranolov (max. hĺbka = 80 mm od povrchu hranolov) už pri 8 minútovom MW ohreve. Treba ale podotknúť, že pri likvidácii lariev drevokazného hmyzu je nutné uvedenú teplotu udržať ešte po dobu ďalších 20 až 30 minút.

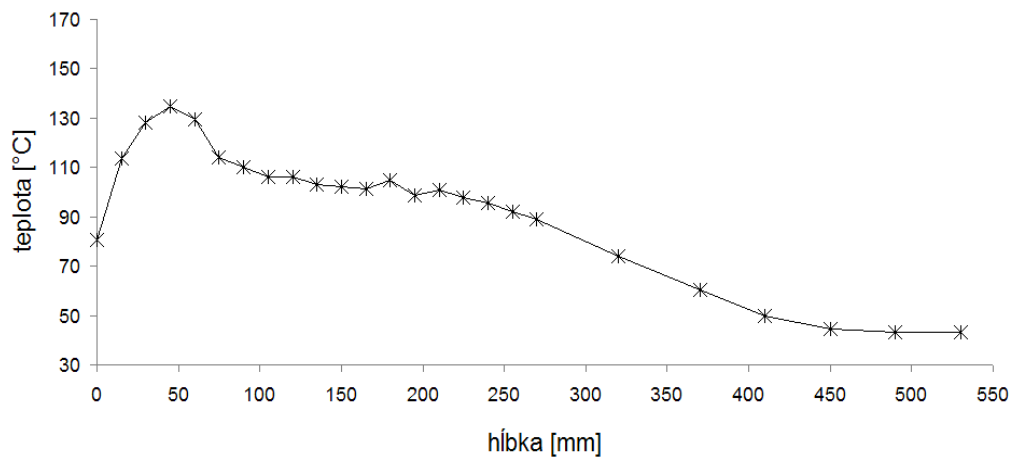
### Zhodnotenie experimentu typu B

Priebeh teplotnej krivky z experimentu typu B sme stanovili pomocou termovíznej kamery po ukončení MW ohrevu, t.j. keď sa model dreveného trámu  $250 \times 200 \times 530$  mm rozobral na 24 samostatných dosiek (Obr. 5). Z nameraných výsledkov sme mohli posúdiť aj priestorové rozloženie nehomogénneho teplotného poľa v modelovom tráme: – plošné v jednotlivých doskách (Obr. 6); – hrúbkové v danom tráme (Obr. 5). Je zrejmé, že okrajové zóny modelového trámu (zóny geometricky identifikovateľné podľa rastra dosiek v modeli), t.j. vrstva dosiek k MW anténe najbližšia a vrstva dosiek od MW antény vzdialenejšie, sa neohrievali dostatočne rýchlo (Obr. 5).



**Obr. 4** Teplotné krivky v rôznych hĺbkach smrekových hranolov (cm) pri experimente typu A: a) vstupná vlhkosť dreva  $95 \pm 5 \%$ , b) vstupná vlhkosť dreva  $10 \pm 1 \%$ .

**Fig. 4** Temperature curves in different depths of spruce beams (cm) at the trial of A type: a) initial moisture content of wood was  $95 \pm 5 \%$ , b) initial moisture content of wood was  $10 \pm 1 \%$ .



**Obr. 5** Priemerný teplotný profil v priereze dreveného modelu  $250 \times 200 \times 530$  mm zloženom z dosiek pri experimente typu B po ukončení MW ohrevu trvajúcom 20 minút.

**Fig. 5** Average temperature profile in the wooden model  $250 \times 200 \times 530$  mm conglomerated from spruce boards at the trial of B type after MW heating lasting 20 min.

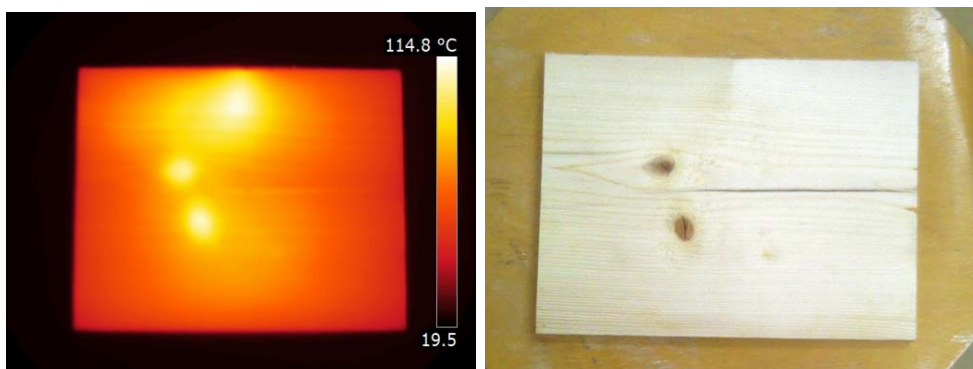
Termovízne snímky povrchu dosiek vyhotovené po 20 minútach MW ohrevu modelového trámu sú uvedené na Obr. 6 až 8. Z nameraných teplotných polí vyplynul poznatok, že MW sterilizačný ohrev dreva na teploty cca  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  do hĺbky 200 až 300 mm od povrchu sa dá doceliť už za 20 minút, konkrétne pri hustote ohrievacieho výkonu  $1 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$  a pri vlhkosti dreva  $10 \%$  (Obr. 5). V praxi teda sterilizačný ohrev prierezovo väčších drevených prvkov, ako sú väzné, stropné alebo zrubové trámy, možno reálne vykonať už v časovo prijateľných intenciách.



**Obr. 6** Termovízny snímok teplotného poľa v doske so šiestimi miestami merania (15. doska  $250 \times 200 \times 15$  mm) → Obr. 5 = použila sa priemerná teplota zo 6 meraní.

**Fig. 6** Thermal imaging of thermal field in the board with six measure places (15th board  $250 \times 200 \times 15$  mm) → Fig. 5 = it was used average temperature of 6 measurements.

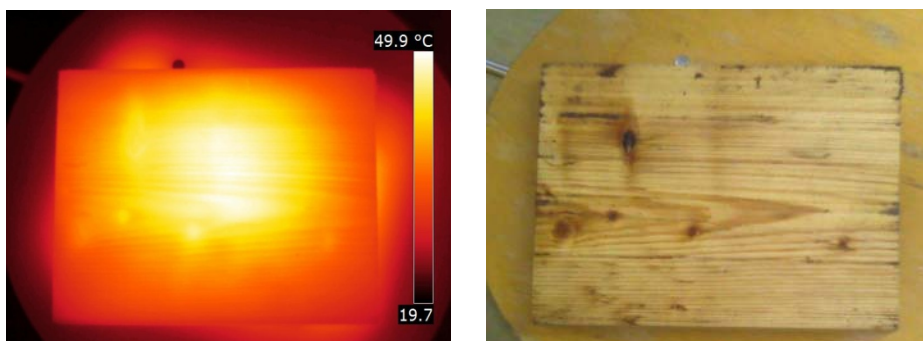
Je známe, že infračervený ohrev sa úspešne použil na identifikáciu hčč (QUIN *et al.* 1998). V našom experimente sa dokumentovalo, že aj po MW ohreve je možné identifikovať výskyt hčč na základe rozdielných povrchových teplôt hčč a okolitého dreva. Väčšie hrče a ich zvýšená hustota spôsobuje nárast dielektrických vlastností drevnej substancie hčč, v dôsledku čoho sa zvyšuje absorpcia energie elektromagnetického poľa hrčami a hrče sú teplejšie ako okolité drevo (Obr. 7).



**Obr. 7** Termovízny snímok teplotného poľa v prvej vrstve modelu trámu (1. doska  $250 \times 200 \times 15$  mm) s ukázkou vyšších teplôt v hrčiach.

**Fig. 7** Thermal imaging of thermal field in the first layer of the beam model (1st board  $250 \times 200 \times 15$  mm) with illustration of higher temperatures in knots.





**Obr. 8** Termovízny snímok tepelného poľa v poslednej 24. vrstve modelu trámu (24-tá doska 250 × 200 × 40 mm) – vid' Obr. 3.

**Fig. 8** Thermal imaging of thermal field in the last layer of the beam model (24th board 250 × 200 × 40 mm) – see Fig. 3.

## ZÁVER

Experimenty zamerané na skúmanie teplotných kriviek a polí v smrekovom dreve pri jeho jednostrannom mikrovlnnom (MW) ohreve, konkrétne pri MW ožarovaní krátkych hranolov (A experiment) alebo modelových trámov vytvorených z viacerých dosiek o rôznej hrúbke (B experiment), nám potvrdili, že navrhnutý prenosný MW systém s lievikovou anténou dokáže vytvárať v dreve teplotné polia v intervale požadovaných sterilizačných teplôt 55–90 °C. V danom pohľade ho možno využiť k sterilizácii dreva v stavebných konštrukciách, ako aj drevených plastík a iných pamiatkových objektov napadnutých hmyzom a hubami.

Navrhnutý MW systém s anténou, ktorý poskytuje hustotu ohrievacieho výkonu na povrchu dreva 1 W·cm<sup>-2</sup>, umožňuje, aby sa vo vzdialenosti cca 250 mm od povrchu dreva s vlhkosťou 10 % dosiahli teploty v oblasti 90 °C už po 20 minútach ožarovania. Nižšie teploty v oblasti 60 °C, ktoré postačujú pre sterilizačnú likvidáciu vajčiek a lariev drevokazného hmyzu, možno dosiahnuť za podstatne kratší čas, napr. v hĺbke dreva cca 70 mm už za 8 minút.

Určítym problémom zostáva otázka nerovnomerného rozloženia elektromagnetického poľa v ožarovanom dreve, a tým aj nedoriešená otázka menej rovnomerného rozloženia teploty v priereze sterilizovaného dreva. Tento jav môže v praxi spôsobiť určité problémy pri uplatnení MW sterilizácie pre vzácne najmä historické objekty, v ktorých by vznik nehomogénnych teplotných polí viedol k tvorbe potenciálnych estetických alebo aj funkčných defektov.

## LITERATÚRA

- BELANIS, C. A. 1997. *Antenna theory – analysis and design*. 2nd Edition, John Wiley and Sons. Inc., 136 p. ISBN 0-471-59268-4.
- LEWIS, V. R., POWER, A. B., HAVERTY, M. 2000. Laboratory evaluation of microwaves for control of the western dry wood termite. *Forest Products Journal* 50(5): 79–87.
- MAKOVÍNÝ, I., ŠMÍRA, P., REINPRECHT, L., PAVLÍK, Ľ., SOUČKOVÁ, A., TEREBSYOVÁ, M. 2011. Control of house longhorn beetle (*Hylotrupes bajulus*) larvae by microwave heating. *Wood Research*, (Accepted for publishing).
- MORELL, J. J. 1995. Importation of unprocessed logs into North America: a review of pest mitigation procedures and their efficacy. *Forest Products Journal* 45(9): 41–50.
- QUIN, F. JR., STEELE, P.H., SHMULSKY, R. 1998. Locating knots in wood with an infrared detector system. *Forest Products Journal* 48(10): 80–84.
- REINPRECHT, L. 2008. *Ochrana dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 453 p. ISBN 978-80-228-1863-6.
- SCHMIDT, O. 2007. Indoor wood-decay basidiomycetes: - Damage, causal fungi, physiology, identification and characterization, prevention and control. *Mycological Progress* 6(4): 261–279.

- STEINFURTH, A. 2007. Möglichkeiten und Grenzen thermischer Bekämpfung des Echten Hausschwammes (*Serpula lacrymans*). In: Holzschädlinge im Fokus - Alternative Maßnahmen zur Erhaltung historischer Gebäude. Merkur-Verlag, p. 207–210.
- SUTTER, H. P. 2002. Holzschädlinge an Kulturgütern erkennen und bekämpfen. Bern, Stuttgart, Wien: Haupt Verlag, Paulhaupt, 167 p. ISBN 3-258-06443-1.
- ŠMÍRA, P. 2010: Likvidace dřevokazného hmyzu horkým vzduchem. In: Horkovzdušné sterilizace dřeva – předpoklady, zkušenosti, provádění. Kozlovice: Šmíra print, Česká republika, p. 67–81. ISBN 978-80-874-2702-6.
- TEREBESYOVÁ, M., REINPRECHT, L., MAKOVÍNY, I. 2010. Microwave sterilization of wood for destroying mycelia of the brown-rot fungi *Serpula lacrymans*, *Coniophora puteana* and *Gloeophyllum trabeum*. In: Wood Structure and Properties 10. Zvolen: Arbora Publisher, p. 145–148. ISBN 978-80-968868-5-2.
- ZIELONKA, P., GIERLIK, E. 1999. Temperature distribution during convectional and microwave wood heating. Holz als Roh- und Werkstoff 57(4): 247–249.

### **Pod'akovanie**

Autori vyjadrujú pod'akovanie grantovej agentúre Slovenskej republiky (Granty: VEGA č. 1/0144/09 a VEGA č. 1/0421/10) za finančnú podporu pri spracovaní tejto vedeckej práce.

### **Adresa autorov**

Prof. Ing. Ivan Makovíny, CSc.  
Prof. Ing. Ladislav Reinprecht, CSc.  
Ing. Lubomír Pavlík  
Ing. Monika Terebesyová  
Technická univerzita vo Zvolene  
T. G. Masaryka 24  
960 53 Zvolen  
Slovenská Republika  
imakoviny@gmail.com  
reinpret@vsld.tuzvo.sk  
luboss.pavlik@gmail.com  
terebesyo@gmail.com

Ing. Pavel Šmíra  
Thermo Sanace s.r.o.  
Chamrádova 475/23  
781 00 Ostrava – Kunčičky  
Česká Republika  
info.thermosanace@.eu