



## NEPRIAMA METÓDA HODNOTENIA ÚČINNOSTI TIENENIA ELEKTROMAGNETICKÉHO POĽA DREVOCEMENTOVÝMI KOMPOZITMI S VYUŽITÍM MIKROVLNNÉHO OHREVVU

Ivan Makovíny

### Abstract

*In the paper the possibility of indirect effectiveness evaluation of the electromagnetic field shielding by wood-cement composites modified by carbon with using the microwave heating is presented. The evaluation of damping comes out from experimentally determined thermal profiles of sufficiently thick layer of material, which is irradiated by electromagnetic waves, and from corresponding theoretical relations. It was confirmed that it is possible to evaluate the effectiveness of wood-cement composites modification by various concentrations of carbon by this methodology.*

**Key words:** *electromagnetic waves, absorption, coefficient of attenuation, penetration depth, microwave heating.*

### ÚVOD

K dôležitým charakteristikám materiálu z hľadiska jeho správania sa v elektromagnetickom poli patrí útlm pre elektromagnetické vlnenie. Takáto charakteristika je reprezentovaná napr. reálnou zložkou konštanty šírenia vln, ktorá sa nazýva merným útlmom vlnenia. Je to vlastne recipročná hodnota hĺbky vniku elektromagnetickej vlny. Zisťovanie tejto charakteristiky si vyžaduje znalosť najmä dielektrických vlastností materiálu, ktoré sa získavajú náročným meraním. Keďže vývoj nových materiálov určených na tienenie nežiaducich účinkov elektromagnetických polí v mikrovlnnom pásme frekvencií si vyžaduje značný počet meraní útlmu, resp. dielektrických vlastností materiálu. Navrhli sme a experimentálne sme overili nepriamu metódu stanovenia útlmu.

### Šírenie rovinatej elektromagnetickej vlny v materiáli

Elektromagnetickou vlnou nazývame s konečnou rýchlosťou sa šíriace elektromagnetické pole (EMP). Elektromagnetickým vlnením sa uskutočňuje prenos energie. Po dopade elektromagnetického vlnenia na nedokonalé dielektrikum, napr. drevný materiál sa časť odrazí, časť ním preniká pri postupnom utlmaní, pričom sa energia EMP mení na teplo.

Budeme predpokladať, že elektromagnetické pole pôsobí tak, že vniká do dreva vo forme rovinných elektromagnetických vln. Rovinná vlna je taký prípad elektromagnetického vlnenia, pri ktorom sú vektory charakterizujúce EMP funkciami len jednej súradnice.

Šírenie sa rovinnej vlny pri harmonicky s časom sa meniacim EMP popisuje riešením vlnových rovníc. Vo fázorovom vyjadrení elektrickej intenzity rovinnej elektromagnetickej vlny šíriacej sa v smere osi  $x$  v nekonečne rozsiahлом nedokonalom dielektriku má riešenie tvar, (Benda 1965, Ramo, Whinnery 1960, Zielonka, Gierlik 1999):

$$\hat{E} \cdot e^{j\omega t} = \hat{E}_0 \cdot e^{-(\beta+j\alpha)x} \cdot e^{j\omega t} \quad (1)$$

kde  $x$  – je vzdialenosť od povrchu materiálu v smere kolmého dopadu vlny,  $j$  - je imaginárna jednotka,  $\omega$  - je uhlová frekvencia,  $t$  - čas,

výraz

$$\gamma' = \beta + j\alpha \quad (2)$$

sa nazýva konštanta šírenia vln.

Reálna zložka konštanty šírenia  $\beta$  sa nazýva merným útlmom vlnenia, imaginárna zložka  $\alpha$  sa nazýva fázová konštanta vlnenia. Pre charakterizovanie stratových dielektrík sa výhodne zaviedla relatívna komplexná permitivita

$$\bar{\epsilon}^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3)$$

kde  $\epsilon'$  je relatívna permitivita,  $\epsilon''$  - stratové číslo.

Pre nedokonalé dielektrikum platia vzťahy

$$\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon'}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right)} \quad \alpha = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon'}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} + 1 \right)} \quad (4,5)$$

kde  $c$  je rýchlosť svetla.

Pri šírení a absorpcii elektromagnetických vln majú rozhodujúci význam parametre prostredia.

Člen  $e^{-\beta x}$  v rovnici (1) vyjadruje utlmovanie elektromagnetickej vlny.

Vzdialenosť od povrchu materiálu, v ktorej amplitúda postupujúcej vlny poklesne na  $1/e$  zo svojej hodnoty na povrchu sa nazýva hĺbka vniknutia  $d$ . Táto veličina sa dá vyjadriť ako recipročná hodnota merného útlmu

$$d = \frac{1}{\beta} \quad (6)$$

Predpokladajme, že rovinná elektromagnetická vlna dopadá kolmo v smere osi  $x$  na rovinu dielektrického materiálu (dostatočne veľkej hrúbky, technicky nekonečnej). Potom výraz  $e^{-\beta x}$  vyjadruje tlmenie elektromagnetickej vlny vo vzdialenosti  $x$  od povrchu materiálu (kde platí,  $\lambda = 0$ ). Intenzita elektromagnetického poľa so vzdialenosťou  $x$  od povrchu dielektrika exponenciálne klesá podľa vzťahu

$$E(x) = E_0 \cdot e^{-\beta x} \quad (7)$$

Úpravou rov. (7) dostaneme

$$\frac{E(x)}{E(0)} = e^{-\beta x} \quad (8)$$

resp. pre zoslabenie výkonu elektromagnetickej vlny bude

$$\frac{P(x)}{P(0)} = e^{-2\beta x} \quad (9)$$

$P(0)$  je výkon na povrchu, t.j. absorbovaný materiálom v mieste  $x = 0$ . Obecné je to, výkon dopadajúci na povrch materiálu  $P_i$  zmenšený o odrazený výkon  $P_r$  t.j. platí

$$P(0) = P_i - P_r \quad (10)$$

Hĺbka v ktorej ohrievací výkon klesne na hodnotu  $1/e$  t.j. 63 % zo svojej maximálnej hodnoty na povrchu materiálu, bude korešpondovať s hĺbkou vniku podľa vzťahu

$$D = \frac{d}{2} \quad (11)$$

a pre merný útlm vlnenia  $\beta$  z rov. 6 a 11 dostaneme

$$\beta = \frac{1}{2D} \quad (12)$$

Riešenie časovo-priestorového rozloženia materiálu s vnútornými zdrojmi tepla umožňuje Fourierova rovnica vedenia tepla.

$$\operatorname{div}(-\lambda \cdot \operatorname{grad} \mathcal{G}) + c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} = p(x) \quad (13)$$

kde  $\mathcal{G}$  - teplota,  $\rho$  - hustota,  $c_p$  - merné teplo,  $\lambda$  - koeficient tepelnej vodivosti,  $p(x)$  - merný objemový ohrievací výkon.

Prvý člen rovnice predstavuje teplo odvedené za jednotku času do okolitého prostredia, druhý člen tepelný výkon spotrebovaný na zvýšenie teploty (ohriatie) daného elementu materiálu a pravá strana predstavuje merný ohrievací výkon od vnútorného zdroja tepla  $p(x)$ . Pre mikrovlnný ohrev platí

$$p(x) = \omega \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \cdot E^2(x) \quad (14)$$

Pre krátke časy ohrevu, keď zanedbáme vedenie tepla (t.j. predpokladáme  $\lambda = 0$ ), počiatočná rýchlosť ohrevu bude:

$$\frac{d\vartheta(x,t)}{dt} = \frac{\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \cdot E^2(x)}{\rho \cdot c} \quad (15)$$

resp. pre teplotu  $\vartheta(x, t)$  v čase  $t$ , v mieste  $x$  a v čase  $t$  z rov. 15 dostaneme

$$\vartheta(x,t) = \vartheta_0 + \frac{\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \bar{\varepsilon}'' \cdot E^2(x) \cdot t}{\rho \cdot \bar{c}} \quad (16)$$

kde  $\vartheta_0$  je začiatková teplota v čase  $t = 0$ ,  $\rho$  – hustota,  $\bar{c}_p$  – stredná hodnota merného tepla na intervale teploty  $\vartheta_0$  až  $\vartheta(x)$ ,  $\bar{\varepsilon}''$  – stredná hodnota stratového čísla na intervale teploty  $\vartheta_0$  až  $\vartheta(x)$ .

Pokles teploty materiálu na 63 % vzhľadom na teplotu povrchovej vrstvy môžeme očakávať v hĺbke  $d/2$  za predpokladu, že teplota je priamo úmerná mernému ohrievaciemu výkonu.

Keď jednostranné ožiarenie materiálu MW vykonáme za krátky čas na pomerne nízku teplotu povrchu cca do 80 °C, tak znížime straty radiáciou z povrchu a zároveň aj obmedzíme pohyb tepla kondukciou v skúmanom materiáli. Tak môžeme uvažovať, že zvyšovanie teploty v mieste materiálu  $x$  je priamo úmerné mernému ohrievaciemu výkonu v danom mieste t.j.  $p(x)$  a že platia vzťahy 15 a 16.

## MATERIÁL A METODIKA

Z drevocementových kompozitných dosiek s rôznou koncentráciou uhlíka 0; 5; 10; 15; 20 a 25 hm.%, s hustotou 700 kg.m<sup>-3</sup> sme vyrobili vzorky s rozmermi 350x250x21 mm .

Na prvý experiment tromi opakovaniami pokusu, sme použili tri vzorky po 5 ks vzoriek s koncentraciami uhlíka 0 až 20 hm.%, spolu 3x5x5 = 75 ks.

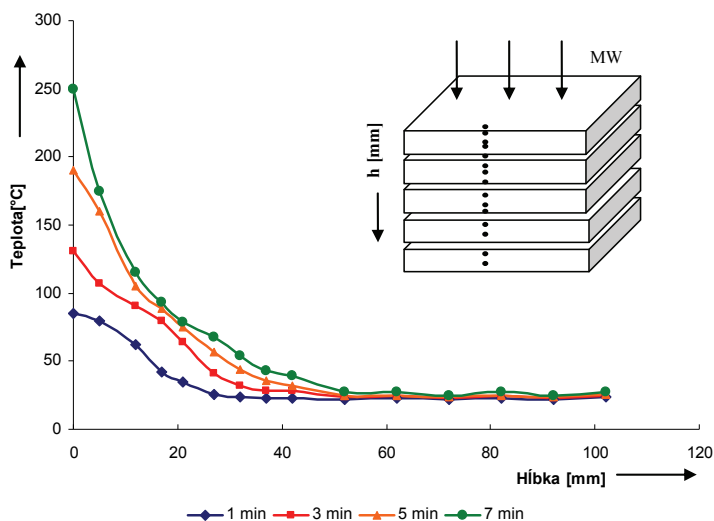
V druhom experimente sme použili tri skupiny vzoriek po 5 ks s rozmermi 350x250x12 mm, hustote 700 kg.m<sup>-3</sup> a koncentracii uhlíka 25 hm.%. Materiál dostatočnej hrúbky, aby sme mohli aplikovať vzťah (7), sme získali tesným uložením 5 ks vzoriek na seba. Meranie teploty na povrchu jednotlivých vzoriek sme realizovali bezdotykovým spôsobom – pyrometrom a po priereze vzoriek materiálu - termoelektrickými článkami, po uplynutí časových intervalov podľa obr. 1 a 2. V prvom experimente celková doba ožarovania materiálu trvala 1, 3, 5 a 7 minút, a v druhom experimente 7 minúty.

Základná receptúra pre výrobu drevocementových kompozitov z drevnej vlny bola rovnaká. Hmotnostné pomery boli voda/portlandský cement = 2, drevo/portlandský cement = 1, chlorid vápenatý 2 hm.% a práškový uhlík s vyššie uvedenými koncentraciami. Hmotnostné percentá práškového uhlíka sa vzťahujú k hmotnosti cementu.

Mikrovlnný ohrev vzoriek sa vykonal s jedným magnetrónom o výkone 700 W pri frekvencii 2,45 GHz s anténou tvaru lievika s profilom 310 x 220 mm.

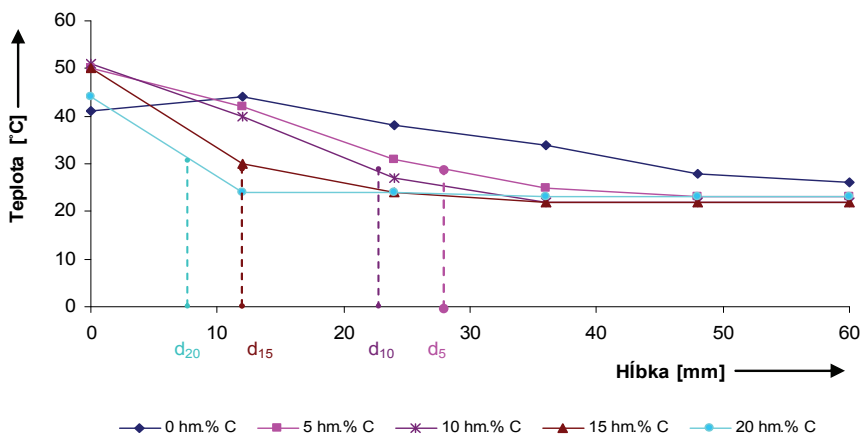
## VÝSLEDKY A DISKUSIA

Priebeh teploty po priereze materiálu sa sledoval v meracích bodoch podľa obr. 1.



Obr. 1 Závislosť teploty od hĺbky vrstvy drevocementových uhlíkom ( $c = 25 \text{ hm.}\%$ ) modifikovaných dosiek po rôznych časoch trvania (1; 3; 5 a 7 min.) jednostranného ožiarenia povrchu mikrovlnami.

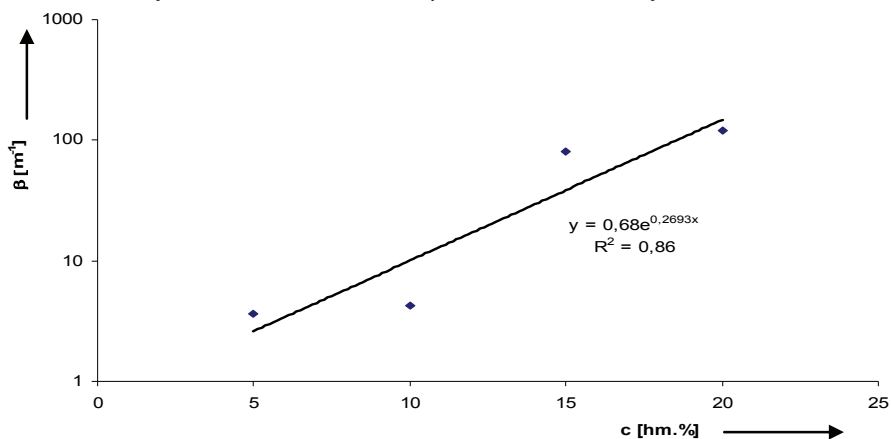
Z teplotných kriviek (obr. 1) nameraných po rôznych časoch trvania mikrovlnného ohrevu, vyplynulo, že sa hĺbka vniku so zmenami času jeho trvania v čase z 1 minúty na 3 minúty, zvýšila o menej ako 10 %. To znamená, že doba trvania ohrevu v čase do 3 minút má malý účinok na zisťovanie hĺbky vniku t.j. aj na hodnoty merného útlmu vlnenia. Pre druhý experiment sme zvolili strednú hodnotu času ožarovania - 2 minúty.



Obr. 2 Závislosť teploty od hĺbky vrstvy drevocementových uhlíkom modifikovaných dosiek o rôznej koncentrácii uhlíka (0; 5; 10; 15 a 20 hm.%), po jednostrannom ožiarení povrchu mikrovlnami, s trvaním 2 minút.

Z obr. 2 je vidieť, že teplotné profily drevocementových uhlíkom modifikovaných dosiek rôznej koncentrácie závisia od koncentrácie uhlíka tak, že ich priebehy korešpondujú s teóriou. Najstrmší pokles teploty nastal v smere šírenia elektromagnetického žiarenia, pri vzorke materiálu s najväčšou koncentráciou uhlíka t.j. 20 hm.% C. So znižovaním koncentrácie uhlíka sa postupne sklon teplotných kriviek znižoval. Na základe

týchto teplotných charakteristík sme stanovili hodnoty vniku vlny  $d_5$  až  $d_{20}$ , z ktorých sme stanovili hodnoty merného útlmu vlnenia  $\beta$ . Stanovené hodnoty sú uvedené na obr. 3.



Obr. 3 Závislosť merného útlmu vlny  $\beta$ , uhlíkom modifikovaných drevocementových dosiek od koncentrácie uhlíka  $c$ .

Experimentálne sa potvrdilo, že hodnoty merného útlmu vlny drevocementových dosiek s rastúcou koncentráciou uhlíka silne klesajú. Dá sa konštatovať, že navrhnutým postupom môžeme orientačne posudzovať účinnosť koncentrácie uhlíka na útlmové vlastnosti tohto materiálu.

## ZÁVER

Potvrdilo sa, že po jednostrannom ohreve hrubej vrstvy materiálu mikrovlnným zariadením je možné nepriamo z teplotného profilu stanoviť hĺbku vzniku vlnenia a tým približne aj merný útlm materiálu. Navrhnutá metóda bola využitá pri vývoji drevocementových dosiek modifikovaných uhlíkom, určených na tienenie nežiaducich elektromagnetických polí.

## LITERATÚRA

1. BENDA, O.: Teoretická elektrotechnika III. SVŠT Bratislava 1965, 223 s., (učebné texty).
2. RAMO, S. - WHINNERY, J. R.: Felder und Wellen in der modernen Funktechnik. Lösungen der Aufgaben. VEB Verlag Technik Berlin, 1960, 590 s.
3. MAKOVINY, I.: Interaction of electromagnetic field with wood and wood - based materials. Technická univerzita, Zvolen, 1999, 62 s.
4. MAKOVINY, I.: Tienenie elektromagnetických polí drevocementovými kompozitmi. Technická univerzita, Zvolen 2010, 135s.
5. ZIELONKA, P. – GIERLIK, E.: Temperature distribution during conventional and microwave wood heating, Holz ale Roh- und Werkstoff, 57, 1999, 247-249 s.

## Pod'akovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia grantového projektu VEGA 1/0144/09 – „Štúdium využitia mikrovlnného ohrevu a infračerveného ohrevu na blokovanie procesu biodegradácie rastúcich stromov a výrobkov z dreva“.