

## VHODNÁ POLOHA SPEVNŮJÚCEJ UHLÍKOVEJ VRSTVY V UHLÍKOVO-SMREKOVOM KOMPOZITE URČENOM PRE VÝROBU REBIER AKUSTICKÝCH GITÁR

### APPROPRIATE POSITION OF CARBON REINFORCING LAYER IN THE CARBON-SPRUCE COMPOSITE CONVENIENT FOR PRODUCTION OF RIBS IN ACOUSTIC GUITARS

Martin Čulík – Vladimír Račko

#### ABSTRACT

The work deals with the use of carbon fiber as the "new" material to practical use on the ribs of acoustic guitars. The materials that will be used for the production of carbon fiber are analyzed in the introductory parts. Next, the work deals the design of the ribs and location of carbon fiber in the experimental composite. Experimental specimens with different location of carbon layer were then subjected to a test. There was measured the static bending modulus of elasticity ( $E_{oh}$ ) in radial and tangential direction. Bending modulus of elasticity each files, which differentiate in location of carbon layer, were mutually compared. Results showed that the carbon, in some cases, had a significant influence on increase of modulus of elasticity. Therefore, we can state that proposed material is suitable to production of acoustic guitars ribs.

**Keywords:** spruce, resonant material, carbon fiber, modulus of elasticity.

#### ÚVOD

Na výrobu hudobných nástrojov sa používajú rôzne materiály (ROYSTON *et al.*). Avšak vlastnosti dreva je veľmi ťažké, ba takmer nemožné napodobniť. Z hľadiska požiadavky na rezonančné schopnosti sa doteraz najlepšie uplatnilo drevo. Je to podmienené hlavne jeho mikroštruktúrou, v ktorej sú zakódované jeho fyzikálno-akustické a mechanické vlastnosti. Rezonančné drevo vytvára len ihličnatá surovina, kvôli jej homogénnej štruktúre oproti listnáčom, kde pri relatívne nízkej hustote vykazuje vysoký modul pružnosti pozdĺž vlákien a vysokú akustickú konštantu. Na rebrovanie akustických gitár, či celkovo strunových hudobných nástrojov sa využíva kvalitné rezonančné drevo (DANIHELOVÁ 2005, 2009b, a, 2012).

V poslednej dobe sa v akustike častejšie začali uplatňovať zušľacht'ovacie materiály na báze uhlíkových vlákien. Názov uhlíkové vlákno, taktiež karbónové vlákno (z ang. carbon fiber) je názov pre vlákno obsahujúce uhlík v rôznych modifikáciách. Jedná sa o dlhý, tenký prameň s priemerom 5–8 mikrometrov zloženého prevažne z atómov uhlíka. Atómy uhlíka sú spojené mikroskopické kryštály, ktoré sú viac menej orientované paralelne k dlhej osi vlákna. Kryštalové usporiadanie spôsobuje, že vlákno je na svoju hrúbku, veľmi

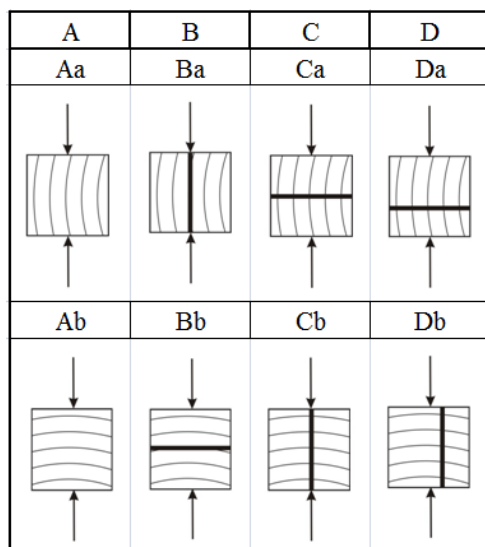
pevné. Hustota vlákna je asi  $1750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Niekoľko tisíc uhlíkových vlákien, ktoré sú zmotané, tvoria spoločne priadzu, ktorá sa môže používať samotná alebo vtkaná do tkaniny (DÚBRAVČÍK 2009). Použitím uhlíkového vlákna v kombinácii s rezonančným drevom smreka môžeme dosiahnuť zlepšenie jeho akusticko-fyzikálnych a mechanických vlastností. V súčasnosti tieto materiály čoraz častejšie nachádzajú uplatnenie pri výrobe, jednak rezonančných dosiek gitár (PEDGLEY *et al.* 2009), pián (BORLAND 2010), hárľ (PREISSNER a ROYSTON 1998, GUNJI *et al.* 2012), ale aj pri výrobe ostatných komponentov týchto nástrojov, ako ich vystužovacie a iné pomocné prvky (ANONIMUS 2012). Okrem výroby hudobných nástrojov sa používajú, aj vo výrobe drevených konštrukcií pod označením FRP (Fibre Reinforced Plastic) alebo CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic) materiály. Uhlíkové vlákna slúžia na spevnenie jednak už zabudovaných konštrukcií, ale často sa používajú aj pri výrobe nových drevených konštrukcií. (VARGA 2006, ALAM *et al.* 2009, GUGUTSIDZE a DRAŠKOVIČ 2010, KIM a HARRIES 2010, JUVANDES a BARBOSA 2012).

Cieľom článku bolo zistiť: (1) – ako sa prejaví rôzna poloha uloženia uhlíkovej výstuhy vzhľadom k anatomickému smeru v dreve a smeru zaťaženia vzhľadom k výstuhe na zmenu modulu pružnosti v ohybe, (2) – na základe zistených hodnôt pružnostných charakteristík a v predchádzajúcich prácach akusticko-fyzikálnych charakteristík vybrať a odporučiť vhodné varianty uloženia uhlíkového vlákna pre výrobu rebier akustických gitár.

## EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

### Návrh kompozitu

Navrhovaný kompozitný materiál je zložený z troch hlavných častí a to z rastlého dreva rezonančného smreka, uhlíkového vlákna a epoxidového lepidla ako spojiva. Konkrétne bolo použité jednosmerné uhlíkové vlákno typu 50K ( $150\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ) rozťahnuté do šírky a spojené mriežkou. Ako spojivo bolo použité syntetické lepidlo ECO-EPOXY 1200-324. Doštičky (polotovary) boli vyrábané z jedného kusa smrekového materiálu získaného zo slovenskej lokality. Drevo sa narezalo hlavne z obvodovej časti, kde je predpokladaná vyššia hustota oproti juvenilnej časti nachádzajúcej sa v strede kmeňa. Na Obr. 1 sú schématicky naznačené priečne rezy navrhovaných súborov skúšobných telies, pri zisťovaní modulu pružnosti v statickom ohybe.



Obr. 1 Osem experimentálnych variant skúšobných telies (v priečnom reze) pre skúšku statického modulu pružnosti v ohybe (Skupina polohy uhlíkovej výstuhy, A – bez uhlíkovej výstuhy, B – uhlíková výstuha umiestnená v strede skúšobného telesa a orientovaná v tangenciálnom smere, C – uhlíková výstuha umiestnená v strede skúšobného telesa a orientovaná v radiálnom smere, D – uhlíková výstuha posunutá do 2/3 prierezu skúšobného telesa v radiálnom smere).

Fig. 1 The eight experimental variants of the specimens (in cross sections) for static flexural modulus of elasticity test (Group of position the carbon reinforcement layer, A - without the carbon reinforcement layer, B - carbon reinforcement layer in center of the specimen and oriented in tangential direction, C - carbon reinforcement layer in center of the specimen and oriented in radial direction, D - carbon reinforcement layer shifted up to 2/3 of cross-section of the specimen and oriented in radial direction).

## Metóda zisťovania modulu pružnosti v statickom ohybe

Zisťovanie modulu pružnosti v ohybe skúšobného telesa (trojbodový ohyb) bolo vykonané podľa normy (STN-EN-310 1993).

Modul pružnosti v ohybe je pomer medzi zaťažením a priehybom v zóne pružných deformácií (POŽGAJ 1982).

Skúšobné zariadenie:

- Skúšobný stroj (Obr. 2) vhodnej výkonnosti a plynule a rovnomerne sa zväčšujúcim zaťažením, ktorého nepresnosť merania zaťaženia nepresahuje 1 %.
- Posuvné meradlo s presnosťou na 0,01 mm.
- Zariadenie na meranie priehybu s presnosťou na 0,001 mm.
- Záznaménacivé zariadenie priehybu AHLBORN ALMEMO® 2690.
- Klimatizačná komora BINDER.



Obr. 2 Trhací stroj ZDM 25 a detail uloženia skúšobného telesa (v priebehu merania) modulu pružnosti v ohybe.

Fig. 2 Ripper ZDM 25 and detail of location the specimen during measurement of flexural modulus of elasticity.

Postup skúšky:

- Telesá sa najprv klimatizovali v klimatizačnom zariadení na rovnovážnu vlhkosť 8 %.
- V strede dĺžky sa zmerali šírka a výška skúšobného telesa.
- Vzdialenosť medzi stredmi podpier sa nastavila s presnosťou 1 mm pričom podiel vzdialenosti podpier k výške telesa  $l/h \geq 14$  (POŽGAJ *et al.* 1997).
- Skúšobné teleso rozmerov (10 × 10 × 200) mm sa umiestnilo na podpery (Obr. 2), tak aby jeho pozdĺžna os bola kolmá na os podpier, aj na os zaťažovaného ohybového tŕňa (STN-EN-310 1993).
- Na skúšobné teleso sa počas trvania skúšky pôsobilo postupne dvomi silami ( $F_1$  a  $F_2$ ) a zodpovedajúce priehyby ( $d_1$  a  $d_2$ ) sa zaznamenali s presnosťou 0,001 mm podľa normy (STN-EN-310 1993).

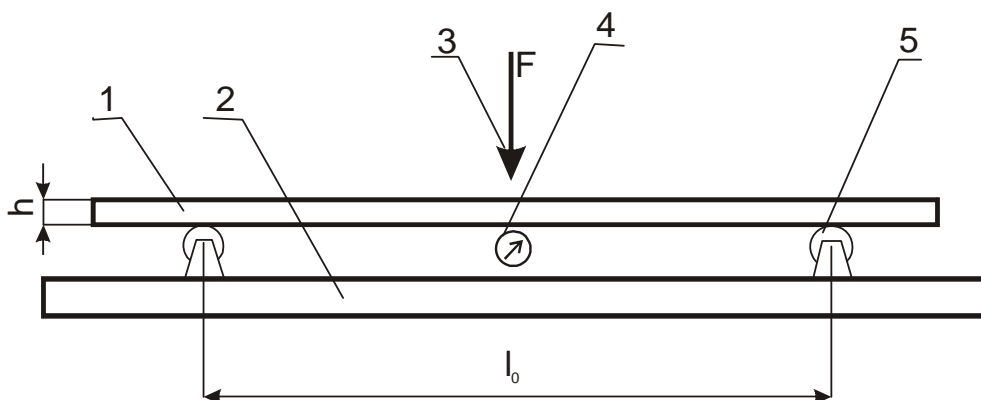
Výpočet modulu pružnosti v ohybe:

Modul pružnosti v ohybe  $E_m$  v Pa, každého skúšobného telesa sa vypočítal podľa vzorca (STN-EN-310 1993). Platí:

$$E_m = \frac{l^3(F_2 - F_1)}{4 b t^3(d_2 - d_1)}, \quad [1]$$

kde  $l$  – vzdialenosť medzi stredmi podpier [mm];  $b$  – šírka skúšobného telesa [mm];  $t$  – výška skúšobného telesa [mm];  $F_2 - F_1$  – prírastok zaťaženia v pružnej oblasti, v N.  $F_1$

predstavoval 10 % a  $F_2$  30% zo sily na medzi pevnosti;  $d1 - d2$  – prírastok priehybu v polovici dĺžky skúšobného telesa (zodpovedajúci prírastku zaťaženia  $F_2 - F_1$ ) [mm];  $E_m$  – modul pružnosti v ohybe [MPa].



Obr. 3 Schéma merania modulu pružnosti v ohybe. 1 – skúšobné teleso, 2 – základová doska, 3 – zaťažovací tŕň, 4 – priehybomer, 5 – podpera, h – výška skúšobného telesa,  $l_0$  – vzdialenosť podpier (DUBOVSKÝ *et al.* 2001).

Fig. 3 Scheme of measuring the flexural modulus of elasticity. 1 - specimen, 2 - base plate, 3 - load pin, 4 - priehybomer, 5 - prop, h - hight of the specimen,  $l_0$  - prop distance (DUBOVSKÝ *et al.* 2001).









## VÝSLEDKY A DISKUSIA

Priemerné hodnoty hustôt a modulov pružností v ohybe sú uvedené v Tabuľke 1. Z porovnania priemerných hodnôt hustoty je vidieť, že zlepením dreva spolu s uhlíkovou vystužovacou vrstvou, ktorá je 4 × vyššia, ako hustota rezonančného smreka, došlo k nárastu hustoty kompozitu o 16–25 %.

Čo sa týka modulov pružnosti, dvojfaktorová analýza rozptylu nepotvrdila štatisticky významný vplyv faktora orientácie ročných kruhov dreva vzhľadom k pôsobeniu zaťažujúcej sily ( $A_a$ ,  $A_b$ ) (Obr. 5). Naproti tomu orientácia uhlíkovej výstuhy vzhľadom k pôsobiacej sile, oproti prípadom bez výstuhy mala, v niektorých prípadoch štatisticky významný vplyv.

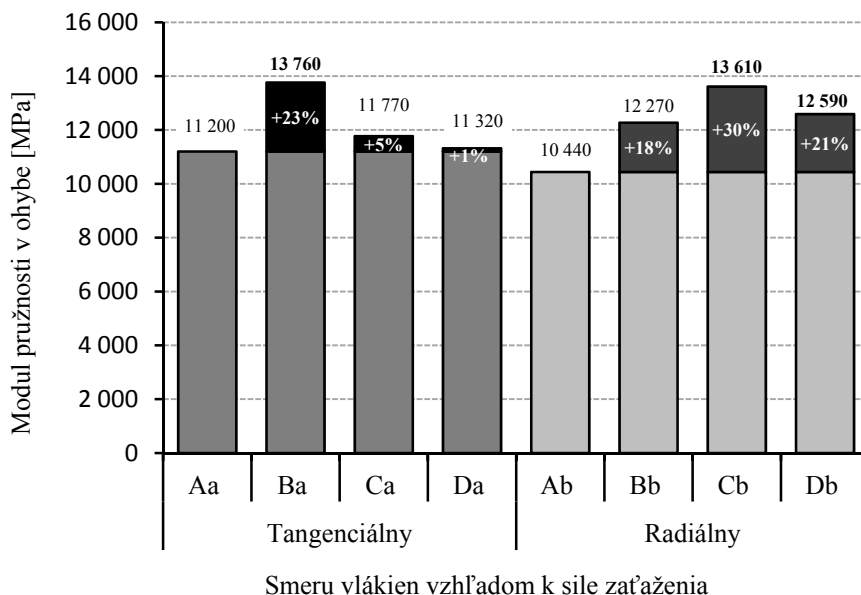
Tab. 1 Základné štatistické charakteristiky modulov pružnosti v ohybe,  $w_a=8$  %.

Tab. 1 Descriptive statistics of flexural modulus of elasticity,  $w_a = 8$  %.

SPUV	n	Modul pružnosti $E$ [MPa]			SPUV	n	Modul pružnosti $E$ [MPa]			Hustota $\rho_8$ [kg.m <sup>-3</sup> ]		
		$\bar{x}$	$S_x$	$V_k\%$			$\bar{x}$	$S_x$	$V_k\%$	$\bar{x}$	$S_x$	$V_k\%$
 Aa	30	<b>11200</b>	2 410	21,5%	 Ab	30	<b>10440</b>	1410	13,5%	<b>407</b>	29	7,2%
 Ba	30	<b>13760</b>	1480	10,7%	 Bb	30	<b>12270</b>	1530	12,5%	<b>469</b>	14	2,9%
 Ca	30	<b>11770</b>	1240	10,5%	 Cb	30	<b>13610</b>	1400	10,3%	<b>506</b>	10	2,1%
 Da	30	<b>11320</b>	690	6,1%	 Db	30	<b>12590</b>	1310	10,4%	<b>490</b>	14	2,9%

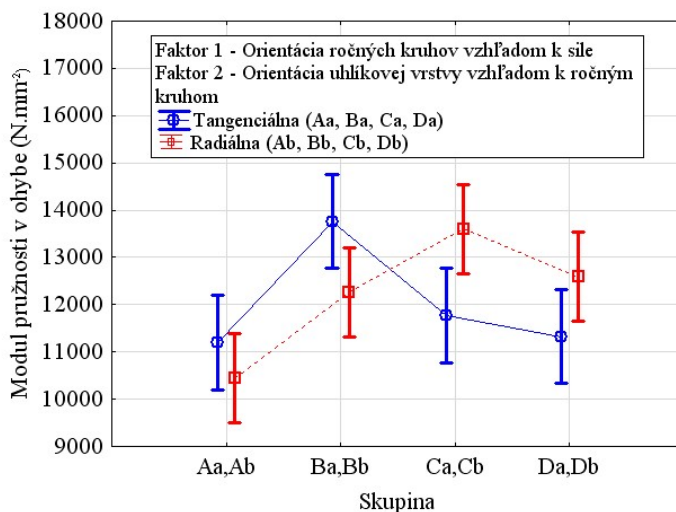
SPUV - Skupina polohy uhlíkovej výstuhy a smeru vlákien

Najvyššiu hodnotu modulu pružnosti  $E$  pri tomto meraní dosahujú skupiny skúšobných telies „Ba, Cb, Db“ (Tabuľka 1, Obr. 4 a 5). Ich priemerné hodnoty sa vplyvom použitej uhlíkovej výstuhy zvýšili v rozpätí od 21–30 %, oproti pôvodným hodnotám, meraných na dreve bez výstuhy. Všetky tieto skupiny majú uhlíkovú výstuhu umiestnenú vertikálne vzhľadom na pôsobiacu silu.



**Obr. 4 Priemerné hodnoty modulov pružnosti v ohybe v skúmaných skupinách.**  
**Fig. 4 Average values of flexural modulus of elasticity in investigated groups.**

V ostatných prípadoch nárast modulu pružnosti, oproti nevystuženým vzorkám bol menší (prípady Bb o 18 %), alebo len minimálny (prípady Ca a Da 1–5 %). V prípade umiestnenia výstuhy do stredu prierezu nosníka (Ca) bola výstuha umiestnená do miernej tlakovej zóny. To sa prejavilo miernym nárastom modulu, oproti modulu bez výstuhy (Aa) o 570 MPa, čo predstavovalo len 5 % (Obr. 4). V prípade excentrického umiestnenia uhlíkovej vlákna skupiny telies „Db“ dochádza pri zaťažení ohybom k vzniku namáhania aj na krut. Z tohto dôvodu bol nameraný modul pružnosti nižší ako pri symetrickom vystužení skupiny telies Cb, kde bolo namáhanie len v ohybe.



**Obr. 5 Dvojfaktorová analýza rozptylu vplyvu anatomického smeru a polohy uhlíkovej výstuhy.**  
**Fig. 5 Two-way ANOVA of anatomical direction and position of carbon reinforced layer.**

Posunutím výstuhu do 2/3 prierezu od vrchu skúšobného telesa (Da) sa dosiahol minimálny vplyv na hodnotu modulu, ktorý narástol len o 120 Mpa (1 %). Je ťažké porovnať navrhované kompozitné materiály s materiálmi uvedenými v literatúre (FRP a CFRP kompozity určené pre stavebné účely), pretože sa výrazne líšia v rozmeroch a vo výskyte hŕč. Najčastejšie používané umiestnenie spevňujúcej vrstvy uvádzané v literatúre je na povrch spodnej časti nosníka (v ťahovej zóne). Literatúra udáva rôzne hodnoty nárastu sily na medzi pevnosti. Oproti nevystuženým nosníkom, u smrekových hranolov 75 × 75 × 1000 mm bol zistený nárast sily len o 15 % (VARGA 2006), u dreveniny *Tsuga chinensis* sa zvýšil až o 44 % (LI *et al.* 2009). Ale s použitím vyššieho počtu vrstiev sa výrazne nemenil. Pri dvoch a troch pozitívnych vrstvách sa zvýšil len na 55 a 58 %.

Pri použitej experimentálnej metóde statickým ohybom vystupuje skupina „A“ bez výstuhu s najnižším modulom pružnosti avšak najvyššou akustickou konštantou vzhľadom na najnižšiu hustotu. Orientácia ročných kruhov dreva vzhľadom k pôsobeniu sily zaťaženia je štatisticky nevýznamná. Pozitívne výsledky sú dosiahnuté pri vertikálnom uložení uhlíkového vlákna a to hlavne u skupín „Ba, Cb, Db“. Napriek tomu sa pri všetkých meraniach preukázala ako najlepšia varianta s uloženíím uhlíkovej výstuhu v tangenciálnom smere (skupina „Ba“). Výsledky meraní potvrdili, že skupina telies „Ba“ z pohľadu aj praktickej výroby (orientácia vlákien kolmo na dosku) rebrovania rezonačných dosák akustických gitár má svoje opodstatnenie. Snahou výrobcov strunových hudobných nástrojov je vyhľadávanie materiálu, na rebrovanie rezonančných dosák, s vysokým modulom pružnosti (s danou orientáciou vlákien na rovinu rezonančnej dosky) pri relatívne nízkej hustote. Ale aj ostatné varianty („Cb, Db“) sú z pohľadu pružnostných ohybových vlastností vhodné, ale ich použitie bude v praxi potrebné overiť. Všetky telesá obsahujúce drevo a uhlíkovú výstuhu vykazovali zvýšenú hustotu a zníženú akustickú konštantu (ČULIK 2012, ČULIK a DANIHELOVÁ 2012). Okrem využitia uhlíkového vlákna na rebrovanie rezonančných dosák hudobných nástrojov, môže mať uplatnenie aj na ine časti hudobných nástrojov, kde je požadované zvýšenie tuhosti materiálu.

## ZÁVER

Výsledky potvrdili, že uhlíková výstuha použitá v kombinácii s rezonančným drevom Smreka obyčajného, umiestnená v rôznych variantách polohy vzhľadom k ročným kruhom a zaťažujúcej sile, má významný vplyv na modul pružnosti v ohybe.

Štatisticky významné zvýšenie modulu pružnosti bolo dosiahnuté hlavne pri skupinách, kde bola orientácia výstuhu rovnobežná so smerom zaťažujúcej sily. Celkové zvýšenie modulu pružnosti vplyvom výstuhu sa pohybovalo v rozpätí 21–30 %. Naproti tomu v prípadoch, kedy zaťažujúca sila pôsobila kolmo na výstuhu, boli moduly pružnosti oproti rastlému drevu štatisticky nevýznamné.

## LITERATÚRA

- ALAM P., ANSELL M. P., SMEDLEY D. 2009. Mechanical repair of timber beams fractured in flexure using bonded-in reinforcements. *Composites Part B-Engineering*, 2009, 40(2): 95–106.
- ANONIMUS: 2012. Carbon fiber engineering and design. <http://element6composites.com/applications-music.asp>.
- BORLAND M. 2010. The Characterization of Piano Soundboard Materials with Respect to their Vibrational and Psychoacoustical Properties for Evaluation Purposes. PhD, University of Waterloo, Canada.

- ČULIK M. 2012. Vlastnosti špeciálneho kompozitu smrekového dreva s uhlíkovým vláknom využiteľného na rebrovanie gitár. In *Noise and vibration in practice*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2012, s. 5–8.
- ČULIK M., DANIHELOVÁ A. 2012. Význam použitia smrekového rezonančného dreva vystuženého s uhlíkovým vláknom. In *Nové trendy akustického spektra*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2012.
- DANIHELOVÁ A. 2005. Kvalita dreva ako materiálu na výrobu strunových hudobných nástrojov. In 70. Akustický seminár, Opočno: ES ČVUT v Praze, 2005, s. 47–52.
- DANIHELOVÁ A. 2009a. Modes vibration of bodies and musical instruments. In *SEFI Conference Physics Teaching in Engineering Education*. Wroclaw: Wroclaw University of Technology, 2009.
- DANIHELOVÁ, A. 2009b. Wood characteristics and acoustic quality of musical instruments. In *ACOUSTICS*. Zvolen: Technical Univerzity in Zvolen, 2009.
- DANIHELOVÁ A. 2012. Gitarová doska a rezonančné frekvencie základných módov kmitania. In *Noise and vibrations in practice*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2012, s. 15–18.
- DÚBRAVČÍK M. 2009. Znižovanie hmotnosti automobilových komponentov. In *Transfer inovácií* [online], Dostupné na internete: <<http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/13-2009/pdf/035-036.pdf>>. 2009, s. 2.
- GUGUTSIDZE G., DRAŠKOVIČ F. 2010. Reinforcement of timber beams with carbon fibers reinforced plastics. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 2010, (2): 1–6.
- GUNJI T., OBATAYA E., YAMAUCHI H., AOYAMA K. 2012. A novel method for the reinforcement of harp soundboard. *Journal of Wood Science*, 2012, 58(4): 369–372.
- JUVANDES L. F. P., BARBOSA R. M. T. 2012. Bond Analysis of Timber Structures Strengthened with FRP Systems. *Strain*, 2012, 48(2): 124–135.
- KIM Y. J., HARRIES K. A. 2010. Modeling of timber beams strengthened with various CFRP composites. *Engineering Structures*, 2010, 32(10): 3225–3234.
- LI Y.-F., XIE Y.-M., TSAI M.-J. 2009. Enhancement of the flexural performance of retrofitted wood beams using CFRP composite sheets. *Construction and Building Materials*. 2009, 23(1): 411–422.
- PEDGLEY O., NORMAN E., ARMSTRONG R. 2009. Materials-Inspired Innovations for Acoustic Guitar Design. *INNOVATION FOR ACOUSTIC GUITAR DESIGN METU JFA*, 2009, 26(1): 157–175.
- POŽGAJ A. 1982. Metódy zisťovania mechanických vlastností dreva a drevných veľkoplošných materiálov. 2. vyd. Zvolen: Vysoká škola lesnícka a drevárska vo Zvolene, 1982. 170 s.
- POŽGAJ A., CHOVANEC D., KURJATKO S., BABIAK M. 1997. Štruktúra a vlastnosti dreva. Bratislava: Príroda 1997. 488 s. 80-07-00960-4.
- PREISSNER C., ROYSTON T. J. 1998. Vibroacoustic properties of a composite harp soundboard. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, 104(3): 1767–1767.
- ROYSTON T. J., CARNEY M. J., PREISSNER C., ROXWORTHY J. 2005. Development of a composite material concert harp soundboard to match the structural acoustic performance of a wooden soundboard. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, 117(4): 2540–2540.
- STN-EN-310:1993. Dosky na báze dreva. Stanovenie modulu pružnosti v ohybe a pevnosti v ohybe.
- VARGA A.:2006. CFPR strengthening of timber beams. 6th International PhD Symposium in Civil Engineering. Institute of Structural Engineering ETH Zurich, Zurich

## Pod'akovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: Dobudovanie centra excelentnosti: Adoptívne lesné ekosystémy, ITMS:26220120049, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Práca je tiež súčasťou projektu 1/0163/12 ktorý je financovaný Vedeckou grantovou agentúrou MŠ SR a SAV a projektu KEGA č. 016TUZ-4/2012 „Multimediálne vzdelávacie centrum pre zlepšenie možností produkcie kvalitnejších sortimentov surového dreva.

### **Adresa autorov**

Ing. Martin Čulík, PhD.

Ing. Vladimír Račko, PhD.

Technická univerzita vo Zvolene

Drevárska fakulta

Katedra náuky o dreve

T. G. Masaryka 24

960 53 Zvolen