



AKUSTIČNE LASTNOSTI BUKOVINE PO HIDROTERMIČNI OBDELAVI

ACOUSTIC PROPERTIES OF BEECH WOOD AFTER HYDROTHERMAL TREATMENT

Ervin Žveplan^{1*}, Aleš Straže¹

UDK 630*812.12

Izvleček / Abstract

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Izvleček: Raziskali smo akustične lastnosti bukovine (*Fagus sylvatica* L.) po hidrotermični obdelavi. Iz dveh bukovih hlo-dov smo izžagali 10 parov radialno orientiranih preizkušancev nominalnih dimenzij 500 mm × 160 mm × 12 mm ter jih naravno posušili. Preizkušance smo 1 uro tretirali v nadtlaknem hidrotermičnem procesu pri temperaturi 135 °C. Po uravnovešenju pri 20 °C in 50 % zračni vlažnosti smo preizkušancem določili gostoto, hitrost preleta ultrazvoka v posameznih anatomskih smereh ter barvo po CIELab sistemu. Pri impulznem prečnem mehanskem vzbujanju smo do-ločili še kazalnike akustične kakovosti. Določili smo akustični koeficient (K), dušenje zvoka ($\tan \delta$) in relativno učinko-ovitost akustične pretvorbe (RACE). Po hidrotermični obdelavi smo potrdili zmanjšanje gostote bukovine ter povečanje hitrosti zvoka in togosti v vseh anatomskih smereh. Mehanska anizotropija lesa se je po obdelavi zmanjšala. Celotne barvne spremembe so bile značilno linearno povezane s spremembo gostote in s tem ohranitvijo togosti bukovine. Kazalniki akustične kakovosti hidrotermično obdelane bukovine so se delno izboljšali. Potrdili smo višji specifični modul elastičnosti in akustični koeficient ter manjše dušenje prečnega nihanja hidrotermično obdelanega lesa.

Gljučne besede: les, bukev = *Fagus sylvatica*, hidrotermična obdelava, mehanske lastnosti, akustične lastnosti

Abstract: We investigated the acoustic properties of beech wood (*Fagus sylvatica* L.) after hydrothermal treatment. Two beech logs were cut into 10 pairs of radially oriented specimens with the dimensions 500 mm × 160 mm × 12 mm and air dried. Specimens were thermally treated for 1 hour in saturated vapour pressure atmosphere at 135 °C. After the treatment the specimens were conditioned at 20 °C and 50 % RH and their wood density, speed of ultrasound in all di-rections and colour properties in CIELab colour space were determined. Free flexural vibration tests were used afterwards to determine the acoustic properties of wood. We defined acoustic coefficient (K), damping of sound ($\tan \delta$) and relative acoustic conversion efficiency (RACE). The study confirmed a significant decrease of wood density after the hydrothermal processing. The increase in speed of ultrasound in hydrothermally-treated wood caused no change in the modulus of elasticity in all anatomical directions. Mechanical anisotropy of wood decreased slightly after the treatment. The colour measurements of specimens showed a linear correlation between the total colour change and change of wood density and stiffness. The acoustic properties of hydrothermally treated beech wood were partly improved due to the increase in the specific modulus of elasticity and the acoustic coefficient combined with the decrease in vibration damping.

Keywords: wood, beech, *Fagus sylvatica*, hydrothermal treatment, mechanical properties, acoustic characteristics

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Les zaradi nepogrešljivih fizikalnih in mehanskih lastnosti uporabljamo za izdelavo različnih glasbenih inštrumentov. Akustične lastnosti lesnih vrst so v ve-liki meri definirane z njihovo anatomsko in kemijsko zgradbo v povezavi s homogenostjo strukture lesa na makroskopskem nivoju. Anatomija lesa vpliva na poroznost in s tem na gostoto (ρ) ter togost lesa, do-ločeno z modulom elastičnosti (E). Sposobnost vi-

briranja lesne strukture pa je definirana s specifičnim modulom elastičnosti (E/ρ) in z dušenjem ni-hanja materiala ($\tan \delta$) (Bremaud et al., 2012). To denimo pri iglavcih jasno potrjuje hkratno padanje E/ρ in naraščanje $\tan \delta$, z večanjem mikrofibrilnega kota v sekundarnem sloju celičnih sten traheid (Ono & Norimoto, 1983; Obataya, 2000). Na viskozne last-nosti lesa pomembno vplivata še zgradbi matriksa hemiceluloz in lignina (Olsson & Salmen, 1997) ter tudi inkrustracija ekstraktivov v celične stene (Yano, 1994; Bremaud, 2011).

V slovenskih gozdovih je navadna bukev (*Fagus sylvatica* L.) najbolj razširjena drevesna vrsta. Bukov les je široko, praktično univerzalno uporaben in ga

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za le-sarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenija

* e-pošta: ervin.zeveplan@bf.uni-lj.si

uporabljammo za številne izdelke, med drugim za šolsko pohištvo, krivljene elemente, furnir in razne ploščne kompozite (Čufar et al., 2017). Bukovina pa je slabo zastopana kot material za izdelavo glasbil. V glasbilih jo uporabljamo predvsem zaradi nadpovprečnih mehanskih lastnosti, vendar bolj v delih konstrukcij glasbil, kjer resonanca elementov ni osnovnega pomena. Razlogi za to so že na celičnem nivoju, saj bukov les vsebuje dokaj velik delež parenhima. Pri bukovini je aksialni parenhim apotrahealen, difuzen v agregatih, trakovi pa so dveh velikostnih redov, 2 do 4-redni in nizki ter nad 10-redni in nad 1 mm visoki (Čufar, 2006). To ima za posledico visoke dušilne karakteristike bukovine in s tem slabo radiacijo zvoka. V prid akustičnim lastnostim bukovega lesa niso niti njene kemijske lastnosti, saj vsebuje velik delež bolj amorfnih in higroskopskih hemiceluloz (Fengel & Wegener, 1989). Nenazadnje ima bukovina tudi veliko prečno krčitveno anizotropijo (Gorišek, 1992). Pogosto vsebuje tenzijski les, rdeče srce in tile v prevodnih elementih (Čufar, 2006; Gorišek, 2009), kar so vse negativne lastnosti z vidika uporabe bukovine za izdelavo glasbenih instrumentov.

Navkljub naštetim inherentnim lastnostim bukovega lesa in slabim predispozicijam z vidika akustičnih lastnosti pa obstajajo tudi načini njihovega izboljšanja. Znani so poskusi nadomeščanja lesa javorja pri izdelavi kitar z bukovino, toplotno obdelano v klimi pri nižani koncentraciji kisika ter pri blagih temperaturah, med 140 °C in 160 °C (Pfriem et al., 2015, Zauer et. al, 2015). Pri tem so velik delež dušenja mehanskih vibracij pri bukovini uspešno zmanjšali in ga približali dušenju vibracij pri javorjevem lesu. Ugodno so se pri tem zmanjšale tudi higroskopske lastnosti bukovine. Za izboljšanje akustičnih lastnosti lesa listavcev in iglavcev je aktualna tudi kratkotrajna hidrotermična obdelava, s segrevanjem lesa pri temperaturah med 120 °C in 180 °C v nasičeni vodni pari pri 2 barih do 16 barov. Patentirani postopek podjetja Yamaha (Abe & Fujii, 2003) ugodno vpliva na delno razgradnjo amorfnih delov hemiceluloz. S tem se izboljša mreženje hemicelulozno-ligninskega matriksa, dušenje mehanskih vibracij lesa pa se zmanjša.

Glede na navedene pozitivne izsledke iz literature smo pri bukovini želeli preveriti možnosti uporabe kratkotrajne hidrotermične obdelave pri povišanih temperaturah za izboljšanje njenih akustič-

nih lastnosti. V ta namen so nas posebej zanimala možnosti izboljšanja elastomehanskih lastnosti bukovega lesa pri upogibnem in torzijskem nihanju, dušenja teh nihanj ter izbranih akustičnih kazalnikov.

2 MATERIAL IN METODE

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 PRIPRAVA MATERIALA

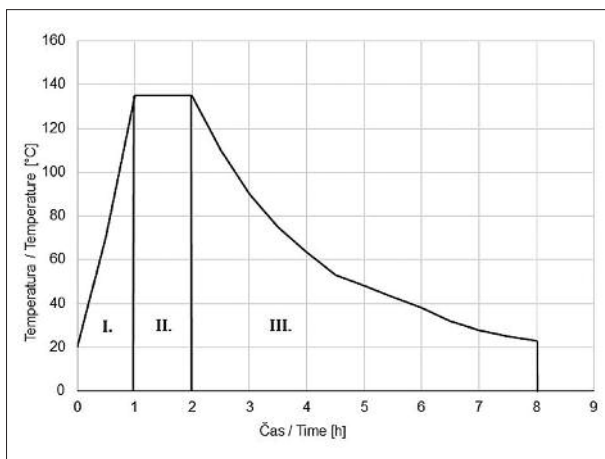
2.1 MATERIAL PREPARATION

Za potrebe hidrotermične obdelave smo pridobili preizkušance iz dveh bukovih dreves (*Fagus sylvatica* L.), brez rdečega srca in s premerom 40 cm. Na prsni višini vsakega drevesa smo izžagali hlodiček dolžine 50 cm. Hlodička smo v svežem stanju razcepili na četrtine, iz katerih smo nadalje izžagali radialno orientirane preizkušance dimenzij 500 mm × 160 mm × 15 mm. Izbranih je bilo 20 sorodnih parov preizkušancev, ki smo jih osušili na prostem do vlažnosti $u = 15 \% \pm 2 \%$. Preučevanje akustičnih lastnosti smo opravili na preizkušancih končnih dimenzij 485 mm × 120 mm × 5 mm. Vsi kosi so bili obdelani na končne dimenzije po toplotni obdelavi in po uravnovešanju, saj je obstajala verjetnost, da bi se med postopkom pojavila veženja in spremembe dimenzij preizkušancev. Preizkušanci so bili uravnovešeni v laboratorijskem sušilnem kanalu pri konstantnih pogojih, skladno s standardom EN 15251 ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi = 50 \%$).

2.2 HIDROTERMIČNA OBDELAVA

2.2 HYDROTHERMAL TREATMENT

Hidrotermična obdelava spada v skupino toplotnih postopkov pri povišani temperaturi. Vrsto toplotne obdelave definira medij, najpogostejši pa so postopki toplotne obdelave v atmosferi z malo kisika. Postopek v tej raziskavi je bil izveden pri povišanem tlaku v nasičeni atmosferi vodne pare. Obdelavo lesa s segrevanjem v nasičeni vodni pari ($T = 135 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 2,5 \text{ bar}$) smo izvajali po naravnem sušenju lesa. Hidrotermični postopek (Slika 1) je bil sestavljen iz več faz; hitra začetna faza segrevanja ($\Delta T/\Delta t = 135 \text{ }^\circ\text{C/h}$), druga faza vzdrževanja temperature 135 °C in tlaka 2,5 bar v času 1 h, ter tretja faza ohlajanja sistema do sobne temperature. Postopku je sledilo 14-dnevno uravnovešanje kontrolnih in tretiranih preizkušancev v laboratoriju (EN 15251). Podobno hidrotermično obdelavo sta uvedla tudi Abe & Fujii (2003), kjer so proces upo-



Slika 1. Potek hidrotermične obdelave bukovine s fazo segrevanja (I.), z delovno fazo (II.) in fazo ohlajanja (III.).

Figure 1. Process of hydrothermal treatment with the heating phase (I.), working phase (II.) and cooling phase (III.).

rabili za izboljšanje akustičnih lastnosti lesa za zvočnice kitar, le da so bili pogoji toplotne obdelave tam še ostrejši.

2.2.1 Določanje barve

2.2.1 Colour analysis

Proces hidrotermične obdelave bukovine smo spremljali tudi z merjenjem barve preizkušancev. V ta namen smo uporabili spektrofotometer SP62, proizvajalca X-Rite GmbH-Optronik™. Vsakemu preizkušancu smo pred in po toplotni obdelavi izmerili tri barvne koordinate po CIELab sistemu za vrednotenje barv (L^* , a^* , b^*). Razlike v barvi preizkušancev pred in po postopku hidrotermične obdelave smo ovrednotili s celotno spremembo barve ΔE .

2.3 MEHANSKA ANIZOTROPIJA

2.3 MECHANICAL ANISOTROPY

Za določanje mehanske anizotropije lesa smo merili hitrosti preleta ultrazvoka (v) v vseh anatomskih smereh lesa (L, R, T), kjer smo iz znane zveze z gostoto (ρ) lesa ($E = \rho \times v^2$) izračunali module elastičnosti (E_L , E_R , E_T). Razmerja vrednosti modulov elastičnosti smo uporabili za kazalnike mehanske anizotropije lesa.

Meritve hitrosti preleta signala smo izvedli z napravo Pundit PL-200, proizvajalca Proceq, Schwerzenbach (CH). Uporabili smo sprejemno in oddajno

sondo z delovno frekvenco ultrazvočnega valovanja 54 kHz. Na vsakem preizkušancu smo izvedli po devet meritev, s tremi ponovitvami v posamični anatomski ravnini. Na zbranih podatkih smo določili povprečja ter izračunali osnovne statistične parametre.

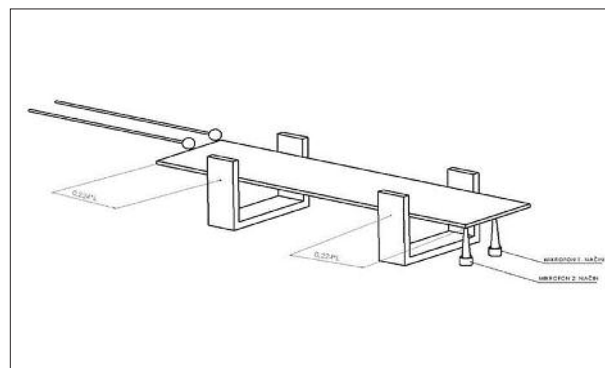
2.4 AKUSTIČNE LASTNOSTI BUKOVINE

2.4 ACOUSTIC PROPERTIES OF BEECH WOOD

2.4.1 Mehansko vzbujanje preizkušancev

2.4.1 Mechanical excitation of specimens

Bukove preizkušance smo mehansko elastično vzbudili v prečno upogibno nihanje. Preizkušanci so bili vzdolžno-radialno orientirani in elastično podprti na 22,4 % njihove dolžine. Impulzno elastično vzbujanje smo izvedli na prosto ležečem kraku preizkušanca, in sicer v geometrijski osi za analizo upogibnega nihanja, ter v vogalu za analizo torzijskega nihanja (Slika 2). Na nasprotnem kraku preizkušanca smo zrcalno namestili kondenzatorska mikrofona PCB 130D20. Zvočni signal smo zajemali z merilno kartico NI-9234, pri 51 kHz frekvenci osveževanja. S hitro Fourierjevo transformacijo signala (FFT) smo pri obeh načinih vzbujanja v programskem okolju LabView določili frekvenčni odziv ter z izračunom logaritemskega dekrementa določili še dušenje zvoka ($\tan \delta$).



Slika 2. Princip eksperimentalne postavitve za prečno vzbujanje bukovih preizkušancev z leseno togo kroglico.

Figure 2. Experimental setup of acoustic radiation measurements for flexural excitation of specimens.

Za vrednotenje prečnega upogibnega nihanja preizkušancev smo uporabili Timoshenkov model nihanja (Enačba 1), ki upošteva tudi strižne napetosti v preizkušancu. Za določitev upogibnega dinamičnega modula elastičnosti v 1. nihajnem načinu in

strižnega modula smo pri tem uporabili Bordonnejevo rešitev (Enačba 2) (Brancheriau & Baillères, 2002).

$$E_X I_{GZ} \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - \rho I_{GZ} \left(1 + \frac{E_X}{K_N G_{XY}} \right) \frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\rho^2 I_{GZ}}{K_N G_{XY}} \frac{\partial^4 v}{\partial t^4} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad \dots(1)$$

Oznake:

- E_X - upogibni modul elastičnosti [Pa],
- I_{GZ} - vztrajnostni moment prereza [m^4],
- v - amplituda nihanja [m],
- ρ - gostota [kg/m^3],
- G_{XY} - strižni modul [Pa],
- K_N - geometrijska konstanta
($K_N = 5/6$... za pravokotne prereze),
- x - razdalja v vzdolžni smeri preizkušanca [m],
- A - prečni prerez [m^2],
- t - čas [s].

$$\frac{E_X}{\rho} - \frac{E_X}{K_N G_{XY}} \left[QF_2(m) 4\pi^2 \frac{AL^4}{I_{GZ}} \frac{f_n^2}{P_n} \right] = 4\pi^2 \frac{AL^4}{I_{GZ}} \frac{f_n^2}{P_n} \left[1 + QF_1(m) \right] \quad \dots(2)$$

Oznake:

- E_X - upogibni modul elastičnosti [Pa],
- G_{XY} - strižni modul [Pa],
- I_{GZ} - vztrajnostni moment prereza [m^4],
- f_n - frekvenca nihanja preizkušanca v i-tem nihajnem načinu,
- P_n - parameter za rešitev Bernoullijeve konstante (m),
odvisne od nihajnega načina (n),
- ρ - gostota preizkušanca [kg/m^3],
- A - prečni prerez [m^2],
- K_N - geometrijska konstanta
($K_N = 5/6$... za pravokotne prereze).

2.4.2 Akustični kazalniki

2.4.2 Acoustic indicators

Z izmerjenimi elastomehanskimi in dušilnimi karakteristikami preizkušancev (Enačba 2) smo določili še nekatere pomembne akustične kazalnike za vrednotenje t.i. resonančnega lesa. Vpliv razlik v gostoti lesa na mehansko togost smo izključili z določitvijo specifičnega modula elastičnosti ($E_{sp} = E/\rho$) ter tudi akustičnega koeficienta ($K = \sqrt{E/\rho^3}$). Akustični koeficient je eden najpomembnejših kazalnikov za izbiro dobrih zvočnih plošč. Z njim ocenjujemo dušenje vibracij plošče v primerjavi z radiacijo zvoka. V primeru zvočnih plošč, na primer godal in brenkal, si želimo čim glasnejšo ploščo, kar

pomeni, da mora biti njena amplituda nihanja visoka (Wengst, 2006). Dodatno smo določili še kazalnik relativne učinkovitosti akustične pretvorbe (ang. Relative Acoustical Conversion Efficiency) ($RACE = \sqrt{E/\rho} / \tan \delta$), ki predstavlja čisto radiacijo zvoka na stopnjo njegovega dušenja in glede na raziskave Obataya et al. (2000), neposredno odraža vpliv materialne mikrostrukture na radiacijo zvoka.

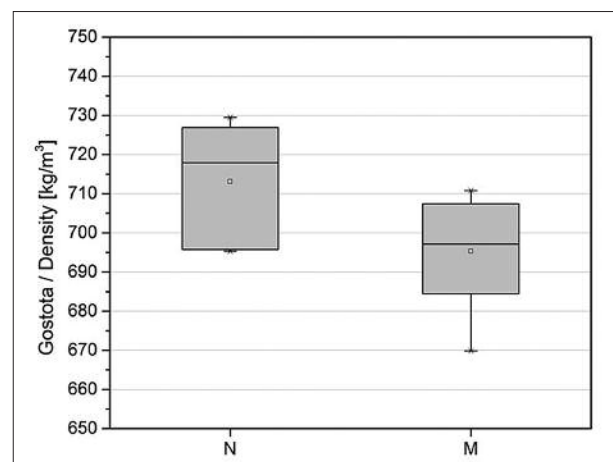
3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 HITROST ZVOKA, MEHANSKE LASTNOSTI IN SPREMEMBA BARVE LESA

3.1 SPEED OF SOUND, MECHANICAL PROPERTIES AND CHANGE OF WOOD COLOUR

Meritve z ultrazvokom so potrdile do 10 % povečanje hitrosti ultrazvoka pri hidrotermično obdelani bukovini, največ prečno na lesna vlakna (Preglednica 1). Hkrati smo po hidrotermični obdelavi potrdili pričakovano, vendar statistično neznačilno zmanjšanje gostote bukovine v povprečju iz 713 kg/m^3 na 695 kg/m^3 ($\Delta\rho = -2,5\%$) (Slika 3). Pozitivne razlike v hitrosti zvoka ob hkratni izgubi lesne mase bukovine po obdelavi so omogočile ohranitev mehanske togosti lesa v vseh anatomskih smereh. Povprečne vrednosti modulov elastičnosti so bile pri hidrotermično obdelani bukovini sicer nekoliko večje, vendar so bile razlike statistično neznačilne. Povprečno izboljšanje hitrosti zvoka prečno na lesna vlakna



Slika 3. Gostota naravne (N) in hidrotermično obdelane (M) bukovine.

Figure 3. Density of untreated (N) and hydrothermally-treated (M) beech wood.

Preglednica 1. Hitrost ultrazvoka, modul elastičnosti ter akustična in mehanska anizotropija bukovine pred in po hidrotermični obdelavi.

Table 1. Speed of ultrasound, modulus of elasticity, acoustic and mechanic anisotropy of beech wood before and after the hydrothermal treatment.

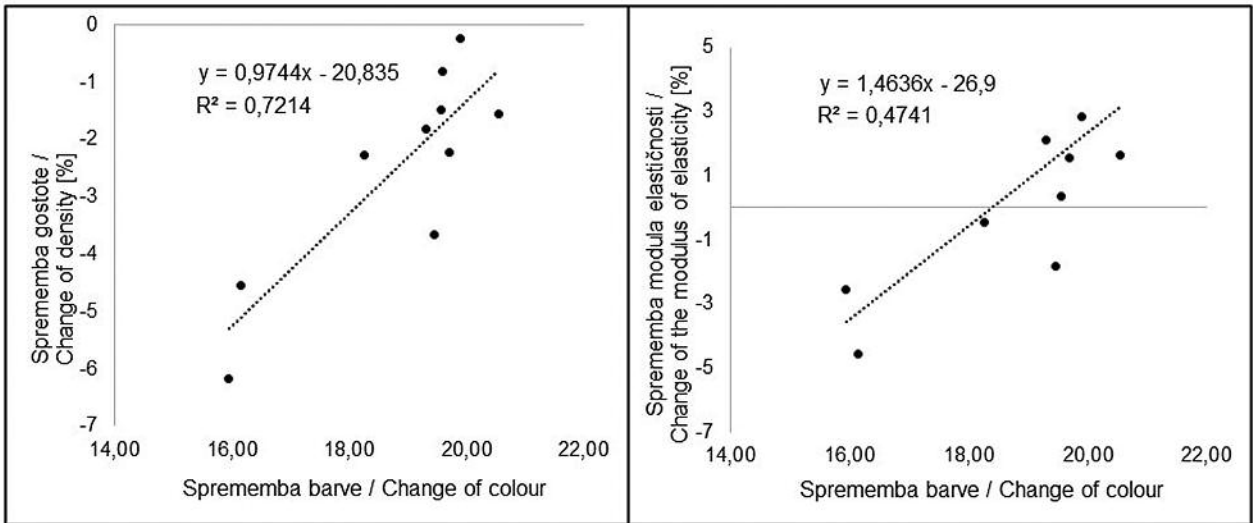
	Hitrost zvoka / Speed of sound [m/s]			Modul elastičnosti / Modulus of elasticity [GPa]			Anizotropija hitrosti zvoka / Anisotropy of the speed of sound			Anizotropija modula elastičnosti / Anisotropy of the modulus of elasticity		
	v _L	v _R	v _T	E _L	E _R	E _T	v _L /v _R	v _L /v _T	v _R /v _T	E _L /E _R	E _L /E _T	E _R /E _T
*MOD	4564	1733	780	14,5	2,1	0,43	2,64	5,89	2,24	6,99	34,92	5,04
KV (%)	1,57 %	5,24 %	8,61 %	4,39 %	9,53 %	16,74 %	6,20 %	8,69 %	9,40 %	12,31 %	18,36 %	19,06 %
ANOVA (p)	0,0432	0,0321	0,1569	0,7800	0,075	0,277	0,1378	0,2817	0,9288	0,1499	0,3142	0,9047
**NEMOD	4493	1634	735	14,4	1,9	0,39	2,76	6,16	2,25	7,65	38,32	5,12
KV (%)	1,66 %	6,07 %	9,52 %	5,01 %	11,97 %	18,73 %	7,05 %	9,64 %	12,77 %	13,87 %	19,50 %	26,17 %

* MOD: Obdelani preizkušanci / Hydrothermally-treated samples **NEMOD: Naravni preizkušanci / Untreated samples

pa je pri hidrotermično obdelani bukovini povzročilo rahlo zmanjšanje akustične in mehanske anizotropije.

Pogoji toplotne in hidrotermične obdelave lesa, sočasno z njegovimi inherentnimi strukturnimi ali zgradbenimi značilnostmi in kemijskimi lastnostmi značilno vplivajo na lastnosti lesa po procesih. Stamm (1956) je odkril, da je termična degradacija materiala večja v sistemu z vodo ali vodno paro. Tudi kasnejše raziskave (Windeisen et al., 2007, Windeisen et al., 2008) so pri hidrotermični obdelavi lesa

pri povišanih temperaturah potrdile večjo razgradnjo hemiceluloz, ki so toplotno bolj občutljive in pri listavcih predstavljajo okoli 30 % strukture. Obenem je tudi znano, da so listavci po večini manj termično stabilni od iglavcev (Fengel et al., 1989). V našem procesu toplotne obdelave lesa se je poleg značilnega zmanjšanja mase in s tem gostote zmanjšala tudi ravnovesna lesna vlažnost, merjena v vzporednih testiranjih (Straže, 2015), kar nakazuje pomembno razgradnjo hemiceluloz.



Slika 4. Odvisnost relativne spremembe gostote lesa in celotne barvne spremembe (levo) ter modula elastičnosti vzdolž lesnih vlaken (E_L) ter celotne barvne spremembe bukovnega lesa po hidrotermični obdelavi (desno).

Figure 4. The dependence of the relative change in the wood density and the total colour change (left). The dependence of modulus of elasticity along the wood fibres (E_L) and the total colour change of beech wood after the hydrothermal process (right).

Raziskava pa je potrdila tudi pomembno povezavo med spremembami gostote lesa v procesu hidrotermične obdelave in barvnimi spremembami. Potrdili smo linearno odvisnost relativne spremembe gostote lesa ter celotne spremembe barve (ΔE) po postopku obdelave (Slika 4), in zabeležili dokaj dobro ujemanje ($R^2 = 0,72$). Podoben trend, z nekoliko šibkejšo korelacijo ($R^2 = 0,47$), se je izkazal tudi pri odvisnosti modula elastičnosti vzdolž lesnih vlaken (E_L) od spremembe barve bukovine po hidrotermični obdelavi.

Povezanost fizikalnih in mehanskih sprememb v postopkih toplotne obdelave so obravnavale tudi druge študije. Johansson et al. (2006) niso potrdili statistične povezave med spremembo barve in upogibno trdnostjo brezovega lesa pri različnih stopnjah toplotne obdelave. Obratno pa Patzelt et al. (2003) omenjajo pozitivno korelacijo med izgubo mase in spremembo barve lesa med toplotno obdelavo.

3.2 AKUSTIČNI KAZALNIKI

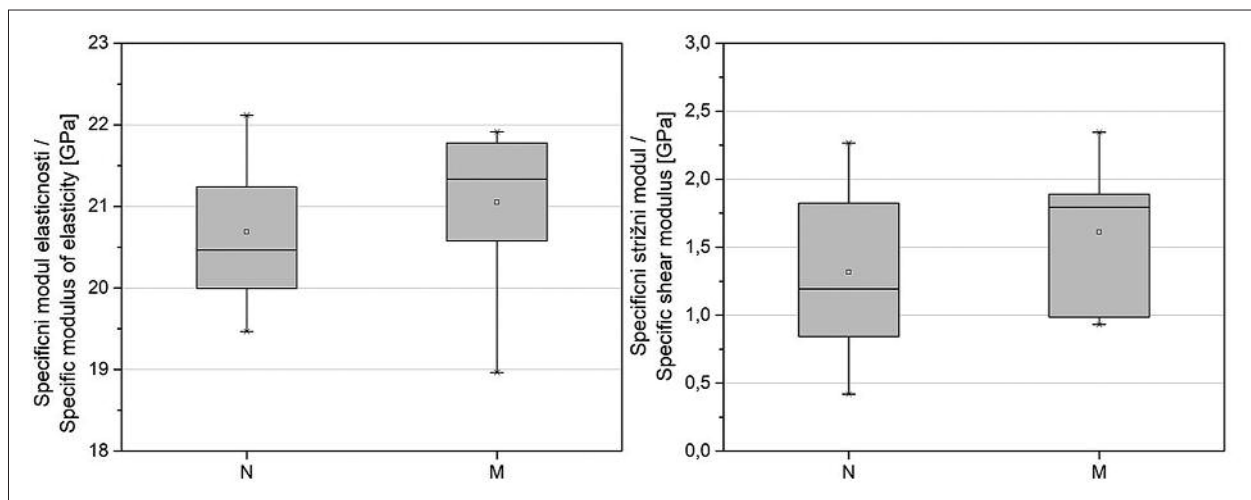
3.2 ACOUSTIC PARAMETERS

Podobno kot pri meritvah z ultrazvokom smo izboljšanje togosti hidrotermično tretirane bukovine potrdili tudi pri prečnem vzbujanju preizkušancev. Povišanje sta izkazala tako upogibni modul elastičnosti, kot tudi strižni modul (Slika 9). Ker je bila gostota bukovine po hidrotermični obdelavi nižja od gostote neobdelanega lesa, sta se ob tem povežala

tudi specifična modula ($E_{SP} = E/\rho$) in ($G_{SP} = G/\rho$), slednji statistično neznačilno (Slika 5).

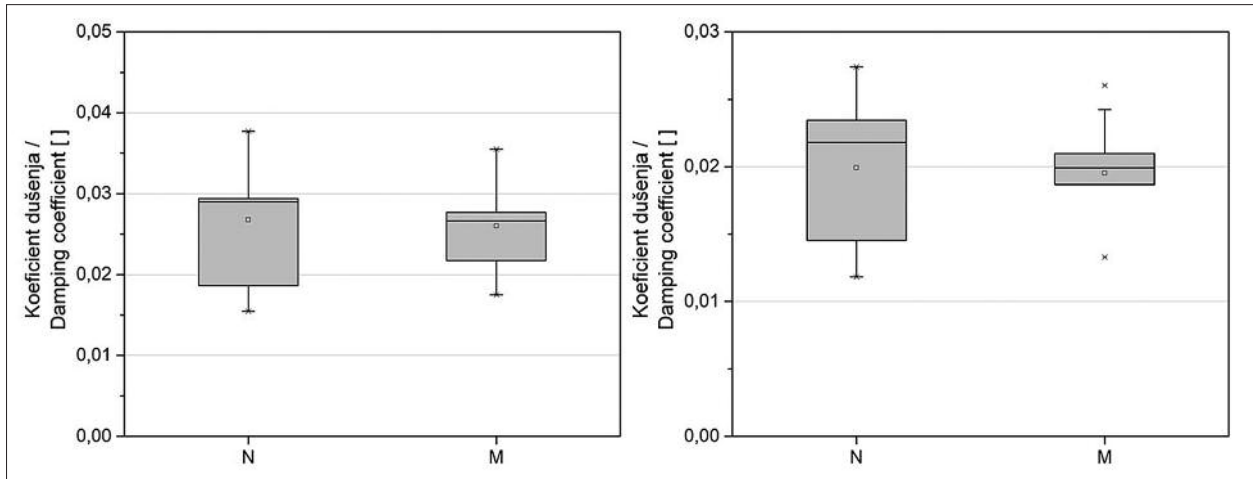
Oba specifična modula sta neposredno povezana z akustičnimi kazalniki, predstavljenimi v nadaljevanju. Njuno izboljšanje je šibko, s čimer ne moremo z gotovostjo napovedati izboljšanja kakovosti akustičnih lastnosti hidrotermično obdelane bukovine po tem postopku. S tem procesom pa kot kaže značilno vplivamo na strukturne značilnosti materiala, ki pa v tej raziskavi niso bile raziskane. Povišanje modulov tako najverjetneje lahko pripišemo t.i. večji strukturni povezanosti materiala. Obstaja namreč domneva, da se med postopkom hidrotermične, kot tudi pri postopkih drugih toplotnih obdelav, hemiceluloze razgradijo ter hkrati skupaj z ligninom presežejo temperaturo steklastega prehoda, kar kasneje ob ohlajanju povzroči delno zamreženje in s tem znižanje deleža amorfnih- in povišanje deleža kristaliničnih delov osnovnih lesnih komponent lesa (Windeisen et al., 2007).

Dušenje vibracij lesa v glasbenih inštrumentih je eden ključnih dejavnikov (Bremaud et al., 2011, Straže et al., 2015), ki določa namen uporabe kosa lesa v posameznem glasbenem inštrumentu. Glede na vrsto inštrumenta uporabljamo tudi različne lesne vrste, konstrukcijske posebnosti in oblike materiala. Vsak kos lesa ima namreč drugačne vibracijske značilnosti zaradi heterogenosti materiala. Z raziskavo smo ugotovili, da se je dušenje upogib-



Slika 5. Specifični modul elastičnosti (levo) in specifični strižni modul (desno) (N – naravna bukovina; M – hidrotermično obdelana bukovina).

Figure 5. Specific modulus of elasticity (left) and specific shear modulus (right) (N – untreated beech wood, M – hydrothermally-treated beech wood).



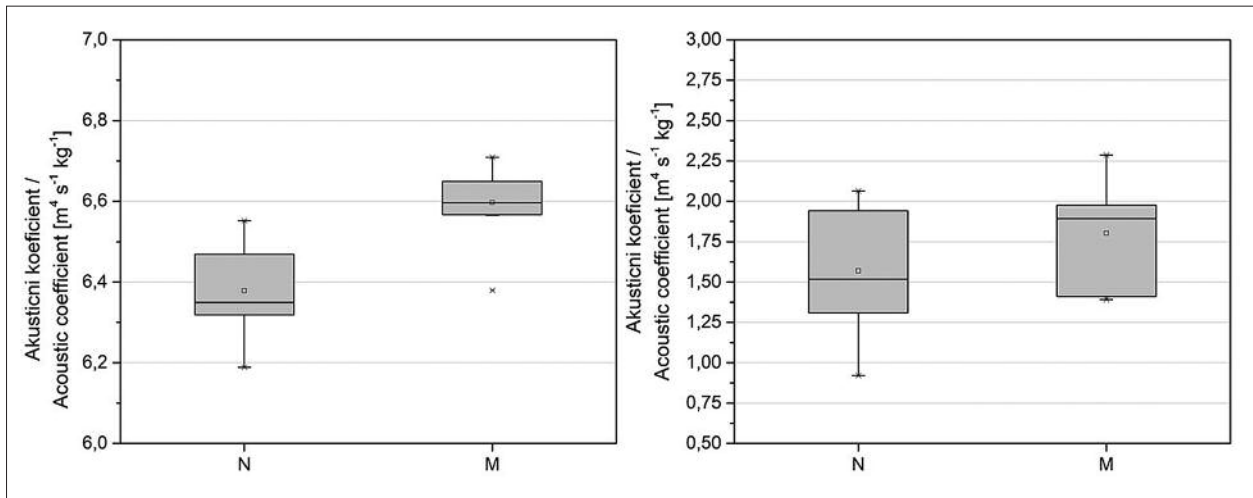
Slika 6. Koefficient dušenja prečnega (levo) in torzijskega nihanja (desno) naravne (N) in hidrotermično obdelane bukovine (M).

Figure 6. Damping coefficient of transverse (left) and torsional vibration (right) of untreated (N) and hydrothermally-treated beech wood (M).

nega kot tudi torzijskega nihanja preizkušancev po hidrotermični obdelavi pri obeh načinih nihanja nekoliko zmanjšalo, vendar ne statistično značilno (Slika 6). Pomembno pa je hidrotermična obdelava vplivala na homogenost rezultatov, kjer je bil raztros rezultatov po obdelavi manjši kot pri naravni bukovini. Specifični modul elastičnosti kot tudi dušenje, naj bi bila po navedbah Obataya et al. (2000) precej povezana s strukturo lesa. Pri iglavcih so tako denimo potrdili, da z večanjem mikrofibrilnega kota

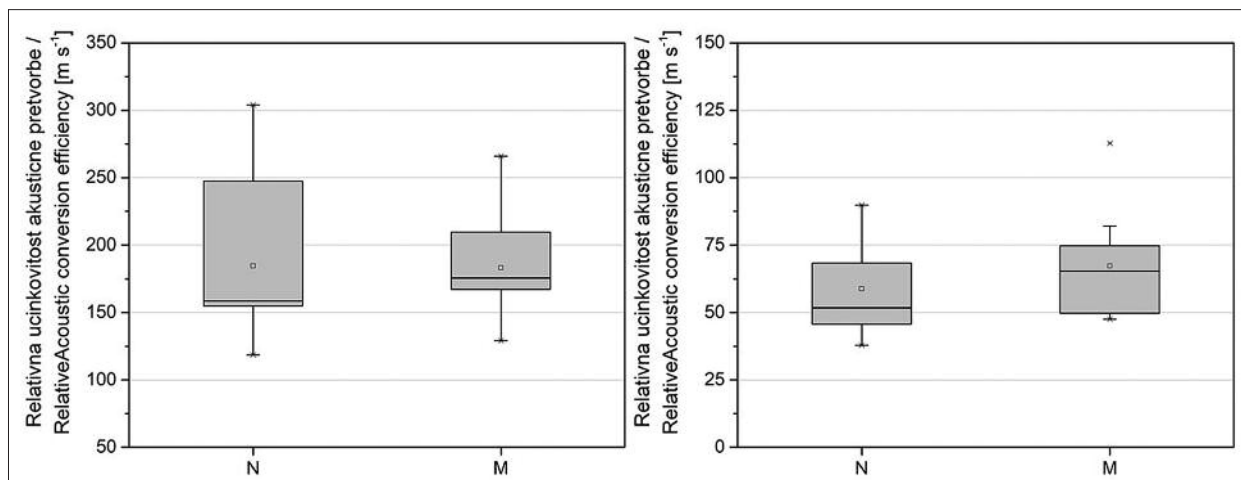
specifični modul elastičnosti upada, narašča pa dušenje.

Pri izbiri materialov za izdelavo glasbenih inštrumentov se namesto specifičnega modula elastičnosti pogosteje upošteva akustični koeficient (K), ki v praksi pove, da je kos lesa, ki je bolj glasen, tudi bolj trden na enoto mase (Wegst, 2006). Za doseganje optimalnega resoniranja delov in komponent glasbenih inštrumentov torej izbirajo kose lesa s čim višjim K in z ustreznimi lastnimi frekvencami. Pri hidrotermično



Slika 7. Akustični koeficienti prečnega upogibnega (levo) in torzijskega nihanja (desno) naravne (N) in hidrotermično obdelane bukovine (M).

Figure 7. Acoustic coefficients of cross bending (left) and torsional vibration (right) of untreated (N) and hydrothermally-treated beech (M).



Slika 8. Relativna učinkovitost akustične pretvorbe (RACE) prečnega (levo) in torzijskega nihanja (desno) naravne (N) in hidrotermično obdelane bukovine (M).

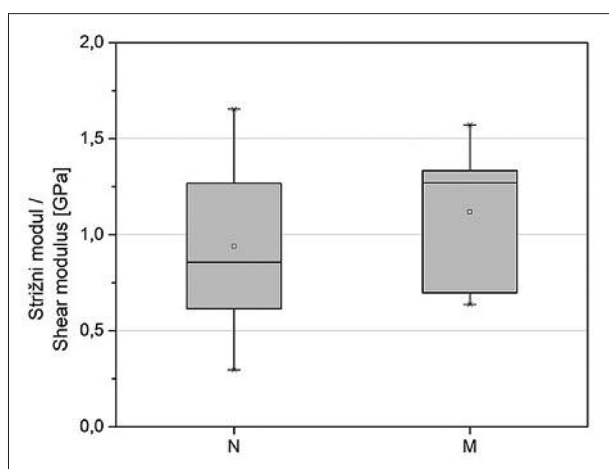
Figure 8. Relative acoustic conversion efficiency transformation (RACE) for transverse (left) and torsional vibration (right) of untreated (N) and hydrothermally-treated beech wood (M).

obdelanih preizkušancih smo ugotovili značilno povišanje K pri upogibnem nihanju ter neznačilno povečanje akustičnega koeficienta pri torzijskem nihanju (Slika 7). V splošnem predstavlja akustični koeficient mero radiacije zvoka materiala glede na njegovo notranje trenje, zato je imajo preizkušanci po tretiranju močnejše izražene frekvence upogibnega nihanja.

Za pojasnitev vpliva strukture lesa na njegovo zvočnost so Obataya et al. (2000) predstavili tudi faktor relativne učinkovitosti akustične pretvorbe (RACE), ki naj bi direktno odražal mikrostrukturne

lastnosti lesa. Pri tem kazalniku smo potrdili le majhno povečanje vrednosti RACE pri torzijskem nihanju hidrotermično obdelanih bukovih preizkušancev (Slika 8).

Slednji rezultat sovpada tudi s strižnim modulom (Slika 9), ki je bil višji pri hidrotermično obdelani bukovini. Že kazalnik K je pokazal, da je ostala radiacija zvoka torzijskega nihanja praktično nespremenjena glede na prečno nihanje. Zaključimo lahko, da je hidrotermična obdelava pozitivno vplivala tudi na torzijsko nihanje bukovine.



Slika 9. Strižni modul naravne (N) in hidrotermično obdelane bukovine (M).

Figure 9. Shear modulus of untreated (N) and hydrothermally-treated beech wood (M).

4 ZAKLJUČKI 4 CONCLUSIONS

Hidrotermična obdelava lesa je pozitivno vplivala na hitrost preleta zvoka v vzdolžni in radialni anatomski smeri bukovnega lesa, kar je vplivalo na ohranitev modulov elastičnosti. Hkrati tudi ugotavljamo, da je ob blagih pogojih in pri kratkotrajnem postopku hidrotermične obdelave izguba mase in s tem gostote lesa relativno majhna.

Pri merjenju barve lesa pred in po hidrotermični obdelavi smo ugotovili, da je sprememba barve značilno povezana s spremembami nekaterih fizikalnih in mehanskih lastnosti. Potrdili smo linearno povezanost spremembe gostote s celotno spremembo barve lesa. Podobna povezanost z barvo je bila potrjena tudi pri spremembi modula elastičnosti v vzdolžni smeri lesa.

Po hidrotermični obdelavi bukovine so imeli preizkušanci v vzdolžni in radialni smeri večji specifični modul elastičnosti v primerjavi z naravnim lesom. V tangencialni smeri pa spremembe niso bile statistično značilne. Po hidrotermični obdelavi se je pri bukovini zmanjšalo dušenje zvoka v vzdolžni in prečni smeri. To je pozitivno vplivalo na povečanje akustičnega koeficienta pri hidrotermično obdelani bukovini, ki pa je navkljub vsemu še vedno relativno nizek.

Na osnovi sprememb akustičnih lastnosti ugotavljamo, da hidrotermična obdelava povzroča strukturne spremembe v bukovini, ki pa jih posebej nismo proučevali. To potrjuje tudi zmanjšanje akustične in mehanske anizotropije bukovine po hidrotermični obdelavi, kar nakazuje izboljšanje nehomogene in anizotropne strukture bukovega lesa.

6 POVZETEK

6 SUMMARY

Beech has favourable mechanical properties and is one of the most used domestic wood species in Slovenia. Due to the prevalence of this species, we investigated options to increase the use of beech wood in the construction of musical instruments. However, one deficiency of beech wood is its significant damping of mechanical vibrations. The reasons for the poor vibrational and tone quality of beech wood are derived from its non-homogeneous anatomical structure, with a large proportion of xylem ray parenchyma. The frequent occurrence of tension wood, large transverse shrinkage anisotropy, presence of tyloses in the vessels and occurrence of red heart also have negative effects on the wood's acoustic properties.

In spite of the less suitable inherent structural characteristics of beech wood, its subcellular properties can be changed, which thus affects the physico-mechanical properties of wood. There is potential for improving the elasto-mechanical and viscoelastic properties of beech wood, in particular, with the use of heat treatment in an atmosphere with inert gases, in a vacuum, and in unsaturated and saturated vapour atmospheres. The latter are hydrothermal treatments, and depend on temperature, pressure and duration. These treatments especially contribute to the decomposition of the amorphous parts of wood hemicelluloses and the cellulose, and improve the networking of the hemicellulose-lignin matrix.

We studied the use of a short-term hydrothermal treatment for changing the acoustic properties of beech wood. Ten pairs of radially oriented specimens with the nominal dimensions of 500 x 160 x 12 mm were cut off from two beech logs and air dried. The 1-hour hydrothermal treatment of the specimens followed in a saturated vapour atmosphere at a temperature of 135 °C and pressure of 2.5 bars. After conditioning at 20 °C and 50 % relative humidity (RH), the density of specimens was determined, as well as ultrasound velocity in individual anatomical directions of wood and the wood colour in the CIELab system. In the radial, tangential and longitudinal directions of the wood, the moduli of elasticity as well as mechanical and acoustic anisotropy were also determined. The specimens were then mechanically excited in transverse-bending mode and in torsional mode of vibration. From the frequency response of the specimens we determined the bending and torsion stiffness, the damping of vibration, and some acoustic quality parameters.

After hydrothermal processing, we confirmed a minimum reduction in the density of beech wood (-2.5 %). The speed of ultrasound increased up to 10 % in beech wood after hydrothermal treatment, and did so most in the transverse direction, which also contributed to the improvement of wood stiffness. Mechanical anisotropy also decreased favourably due to major changes in the transverse direction of the wood. The results also confirmed a characteristic change in the total colour of the wood, i.e. mostly a reduction of colour lightness, which was characteristically and linearly related to the change in wood density and stiffness along the grain. The shear modulus of the beech also improved after the treatment. The acoustic quality parameters of hydrothermally-treated beech wood were partially improved. We confirmed a larger specific modulus of elasticity and acoustic coefficient, as well as a lower damping of transverse bending vibrations and of torsional vibrations of hydrothermally-treated beech wood.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENT

Raziskovalni program št. P4-0015 je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

VIRI

REFERENCES

- Abe, H., & Fujii, H. (2003). Method for manufacturing of modified wood. US patent No. 6.667.429 B2, Washington, U.S. patent office, 23.12.2003.
- Brancheriau, L., & Bailléres, H. (2002). Natural vibration analysis of clear wooden beams: A theoretical review. *Wood Science and Technology*, 36, 347–365.
- Bremaud, I., Amusant, N., Minato, K., Gril, J., & Thibaut, D. (2011). Effect of extractives on vibrational properties of African Padauk (*Pterocarpus soyauxii* Taub.). *Wood Science and Technology*, 45, 735–754.
- Bremaud, I., El Kaim, Y., Guibal, D., Minato, K., Thibaut, B., & Gril, J. (2012). Characterisation and categorisation of the diversity in viscoelastic vibrational properties between 98 wood types. *Annals of Forest Service*, 69, 373–386.
- Bucur, V. (2006). *Acoustics of wood*. Berlin, Springer Verlag, 393 str.
- Čufar, K. (2006). *Anatomija lesa*. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, 185 str.
- Čufar, K., Gorišek, Ž., Merela, M., Kropivšek, J., Gornik Bučar, D., & Straže, A. (2017). Lastnosti bukovine in njena raba. *Les/Wood*, 66, 27–39.
- Divos, F., Tanaka, T., Nagao, H., & Kato, H. (1998). Determination of shear modulus on construction size timber. *Wood Science and Technology*, 32, 393–402.
- Fengel, D., & Wegener, G. (1989). *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Walter De Gruyter.
- Gorišek, Ž. (1992). *Vpliv prečne krčitvene anizotropije lesa na sušenje in stabilnost* (Dokt. disertacija). Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta.
- Gorišek, Ž. (2009). *Les: Zgradba in lastnosti: Njegova variabilnost in heterogenost*. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- Johansson, D., & Moren, T. (2006). The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64, 104–110.
- Mitkovski, B. (2013). *Strukturne in akustične lastnosti lesa za tolkala*. Dipl. projekt. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- Obataya, E., Ono, T., & Norimoto, M. (2000). Vibrational properties of wood along the grain. *J Mater Sci*, 35, 2993–3001.
- Olsson, A.M., & Salmen, L. (1997). The effect of lignin composition on the viscoelastic properties of wood. *Nordic Pulp and Paper Resource Journal*, 3, 140–144.
- Ono, T., & Norimoto, M. (1983). Study on Young's modulus and internal friction of wood in relation to the evaluation of wood for musical instruments. *Japanese Journal of Applied Physics*, 22, 611–614.
- Patzelt, M., Emsenhuber, G., & Stingl, R. (2003). Colour Measurement as means of Quality Control of Thermally Treated Wood. In: *Proceedings of the first European conference on wood modification*. Ghent, Belgium. April 3–4 2003, 213–218.
- Pfriem, A., Wagenführ, A., Ziegenhals, G., & Eichelberger, K. (2005). Use of wood performed by heat-treatment for musical instruments. In: *Proceedings of the Second European Conference on Wood Modification*, Göttingen, 390–397.
- Stamm, A.J. (1956). Thermal degradation of wood and cellulose. *Industrial and Engineering Chemistry*, 48 (3), 39–44.
- Straže, A., Mitkovski, B., Tippner, J., Čufar, K., & Gorišek, Ž. (2015). Structural and acoustic properties of African padouk (*Pterocarpus soyauxii*) wood for xylophones. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73, 235–243.
- Straže, A. (2015). THM treatment causes similar changes of wood properties as wood aging. *Osebna komunikacija*.
- Yano, H. (1994). The changes in the acoustic properties of Western red cedar due to methanol extraction. *Holzforschung*, 48, 491–495.
- Wegst, U. (2006). Wood for sound. *American Journal of Botany*, 93, 1439–1448.
- Windeisen, E., Strobel, C., & Wegener, G. (2007). Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood. *Wood Science and Technology*, 41, 523–536.
- Windeisen, E., Bächle, H., Zimmer, B., & Wegener, G. (2008). Relations between chemical changes and mechanical properties of thermally treated wood. *Holzforschung*, 63, 773–778.
- Zauer, M., Kowalewski, A., Sproßman, R., Stojanek, H., & Wagenführ, A. (2015). Thermal modification of European beech at relatively mild temperatures for the use in electric bass guitars. *European Journal of Wood Products*, 74, 43–48.