



LES/WOOD

VSEBINA / CONTENTS

Letnik 66, številka 2 / Volume 66, Number 2

- **Prvih 70 let Biotehniške fakultete (uvodnik) 3**
Miha Humar
- **Akustične lastnosti bukovine po hidrotermični obdelavi 5 - 14**
Acoustic properties of beech wood after hydrothermal treatment
Ervin Žveplan, Aleš Straže
- **Wood formation in Norway spruce on a lowland site in Slovenia
in 2015 and comparison with other conifers all over Europe 15 - 27**
**Nastajanje lesa smreke na nižinskem rastišču v Sloveniji v letu 2015
in primerjava z iglavci po Evropi**
Fernando Useros, Angela Balzano, Peter Prislan, Martin de Luis, Jožica Gričar,
Maks Merela, Katarina Čufar
- **Upogibna trdnost in togost slojnatega furnirnega lesa (LVL)
iz termično modificirane in nemodificirane bukovine 29 - 36**
**Bending strength and stiffness of laminated veneer lumber (LVL)
made from thermally modified and unmodified beech veneer**
Jaša Saražin, Milan Šernek, Miha Humar, Aleš Ugovšek
- **Uporaba naravnih olj za površinsko zaščito lesa navadne bukve 37 - 46**
Usage of natural oils for surface protection of common beech wood
Jure Žigon, Ajda Pogorelčnik, Marko Petrič, Matjaž Pavlič
- **Analiza poslovanja slovenske lesne panoge 47 - 56**
Slovenian wood industry sector analysis
Jože Kropivšek, Igor Milavec, Bernard Likar
- **Sestava, lastnosti, uporaba in reciklaža Kerrocka 57 - 69**
Composition, properties and application of Kerrock
Matej Vovk, Andrej Beličič, Milan Šernek
- **Možnosti uporabe lesa v dodajalnih tehnologijah (3D-tiskanju) 71 - 84**
Possible uses of wood in additive technologies (3D printing)
Mirko Kariž, Milan Šernek, Manja Kitek Kuzman
- **S projektom APPLAUSE od prepoznave do širše uporabe invazivnih rastlin
z vključevanjem prebivalcev 85**
Maks Merela, Denis Plavčak
- **Srečanje ALUMNI kluba Oddelka za lesarstvo 86**
Katarina Čufar, Boštjan Lesar
- **Društvo inženirjev in tehnikov lesarstva Ljubljana se je preimenovalo v
Društvo lesarjev Slovenije (DLS) 87**
- **Recenzenti člankov/prispevkov revije Les/Wood v letu 2017 87**

Les/Wood

Izdajatelj/Publisher

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenija

Glavna urednica/Editor-in-chief

Katarina Čufar, Slovenija, e-pošta: katarina.cufar@bf.uni-lj.si

Odgovorni urednik/Managing editor

Jože Kropivšek, Slovenija, e-pošta: joze.kropivsek@bf.uni-lj.si

Sourednica/Co-editor

Jožica Gričar, Slovenija, e-pošta: jozica.gricar@gozdis.si

Tehnični urednik/Technical editor

Anton Zupančič, Slovenija, e-pošta: anton.zupancic@bf.uni-lj.si

Uredniški odbor/Editorial board

Dominika Gornik Bučar, Slovenija
Miha Humar, Slovenija
Leon Oblak, Slovenija
Primož Oven, Slovenija
Milan Šernek, Slovenija

Jezikovni pregled/Proofreading

Darja Vranjek (slovensko besedilo/*Slovene text*)
Paul Steed (angleško besedilo/*English text*)

Oblikovanje/Design

Andrej Bajt

Tisk/Print

Tiskarna Roboplast d. o. o., Ljubljana
Natisnjeno v novembru 2017 v 100 izvodih./*Printed in November 2017 in 100 copies.*

ISSN 0024-1067 (tiskana verzija/*printed version*)

ISSN 2590-9932 (spletna verzija/*on-line version*)

<http://www.les-wood.si/>

Periodičnost/Frequency

Dve številki letno/Two issues per year

Les/Wood je referiran v mednarodnih bibliografskih zbirkah

Les/Wood is indexed in the international bibliographic databases

AGRIS, CAB Abstract

Avtorske pravice objavljenih člankov si pridržuje založnik Les/Wood

Copyright of the published articles is owned by the publisher Les/Wood



LES/WOOD

PRVIH 70 LET BIOTEHNIŠKE FAKULTETE

prof. dr. Miha Humar, dekan

Celotno leto 2017 smo posvetili častitljivi sedemdesetletnici Biotehniške fakultete. Vse leto so se vrstile prireditve in dogodki, s katerimi smo opozorili na pomen in vlogo naše ustanove na vseh njenih področjih delovanja, od biologije, prehranske in lesne verige, do krajinske arhitekture, od izobraževalnega in raziskovalnega dela do družbeno odgovornega oblikovanja in prenosa znanja. Vrh teh prireditev je bila svečana akademija v Cankarjevem domu.

Biotehniška fakulteta je nastala v časih povojne obnove in je doživela vse družbene in tehnološke spremembe treh generacij. Iz Agronske fakultete se je postopoma razvila v osrednjo nacionalno ustanovo na multidisciplinarnem področju uporabnih ved o življenju, ki združuje naravoslovne, biotehniške in tudi družboslovne znanosti, za iskanje in širjenje vedenja o življenju od celice do kompleksnih bioloških ekosistemov, od proizvodnje hrane in lesnih izdelkov, do skrbi za naravo in okolje. Zagotavljanje poznavanja bioloških zakonitosti, razumevanje razmerij med okoljem in družbo, varovanje okolja in krajine, varstvo naravne in kulturne dediščine, sonaravna in trajnostna raba naravnih virov, poznavanje temeljnih lastnosti lesa, pridelava in predelava kakovostne hrane ter razvoj sodobne biotehnologije so poslanstvo in jasno zapisani cilji fakultete. V teh sedemdesetih letih smo se iz skromnih predavalnic na Krekovem trgu preselili v razširjeni kampus pod Rožnikom v Ljubljani in Rodico v Domžalah ter vzpostavili pedagoške in raziskovalne objekte po celi Sloveniji.

Pri tem nam je bilo ves čas obstoja in razvoja v močno oporo dejstvo, da smo pomemben sestavni del in ponosna članica Univerze v Ljubljani. Po vseh merilih sodimo med večje in odličnejše članice ljubljanske univerze. Naši sodelavci so pomembno sooblikovali in še vedno sooblikujejo univerzo, z opravljanjem številnih bolj ali manj zahtevnih funkcij,

ki so pomembne za njeno normalno delovanje in zagotavljanje razvoja tudi Biotehniške fakultete.

Naše osnovno poslanstvo, naš smisel in obstoj so študentje, njihov razvoj, veščine in znanje, ki ga pridobijo pri nas na fakulteti. Ton fakulteti dajejo odlični in najboljši študentje, z njimi raste tudi fakulteta, in ponosni smo nanje. Diplomanti različnih smeri in nivojev skupaj z doktoranti od nas zahtevajo, da smo zmeraj boljši in odmevnejši. Spodbujamo obšolsko dejavnost, naši študentje prejemajo nagrade na številnih mednarodnih tekmovanjih od IGMa do Ecotrophelije. Skupaj s študenti organiziramo odmevne poletne šole in start up vikende. Naši diplomanti prevzemajo odgovornosti v gospodarskih družbah, znanosti, politiki in družbi.

V zadnjih tridesetih letih je Biotehniška fakulteta naredila odločne korake k znanstveni odličnosti. Imamo odlične posameznike in raziskovalne skupine, ki skoraj vsako leto objavijo rezultate in izsledke raziskav v eni od vrhunskih revij iz edicij Nature ali Science. Dosežke je mogoče še izboljšati, a za dosego tega se mora spremeniti odnos družbe do znanosti, pa tudi sami moramo več narediti za boljšo organizacijo raziskovalnega dela. Za cilj smo si zastavili Biotehniško fakulteto in hkrati Univerzo v Ljubljani uvrstiti med vodilne raziskovalne institucije v regiji in tudi na seznam vodilnih institucij v svetu, ki pokrivajo uporabne vede o življenju in naravno obnovljivih materialih. Eden od korakov k temu cilju je tudi obuditev izhajanja revije Les. Vsi, ki se tako ali drugače ukvarjamo z lesom, lahko s kvalitetnimi prispevki slovenski strokovni javnosti posredujemo najnovejša raziskovalna in strokovna dognanja. Ponovno izdajanje revije Les sovпада z revitalizacijo slovenske lesne in pohištvene industrije. Verjamem, da lahko skupaj prispevamo k boljšemu jutri.

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 nadtlačnem 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-vitost 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.

Ključne 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

uporabljamo 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, dušenje teh nihanj ter izbranih akustičnih kazalnikov.

2 MATERIAL IN METODE

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 PRIPRAVA MATERIALA

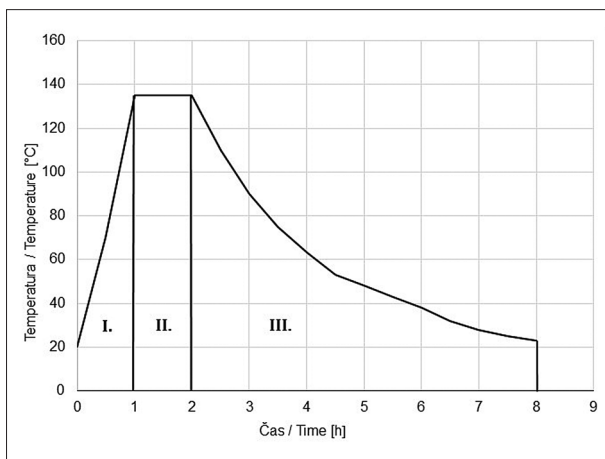
2.1 MATERIAL PREPARATION

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 ($T = 20 \text{ °C}$, $\varphi = 50 \%$).

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 ($T = 135 \text{ °C} \pm 3 \text{ °C}$, $P = 2,5 \text{ bar}$) smo izvajali po naravnem sušenju lesa. Hidrotermični postopek (Slika 1) je bil sestavljen iz več faz; hitra začetna faza segrevanja ($\Delta T/\Delta t = 135 \text{ °C/h}$), 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.

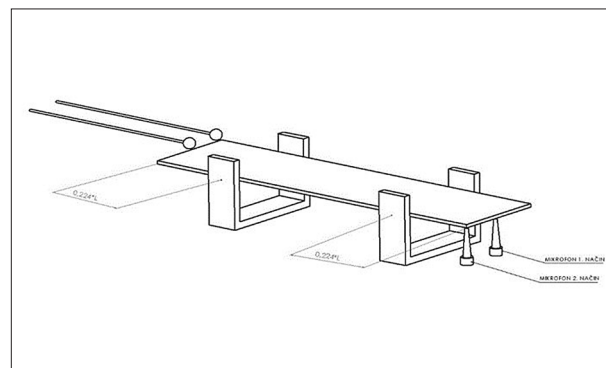
2.4 AKUSTIČNE LASTNOSTI BUKOVINE

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].

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

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.

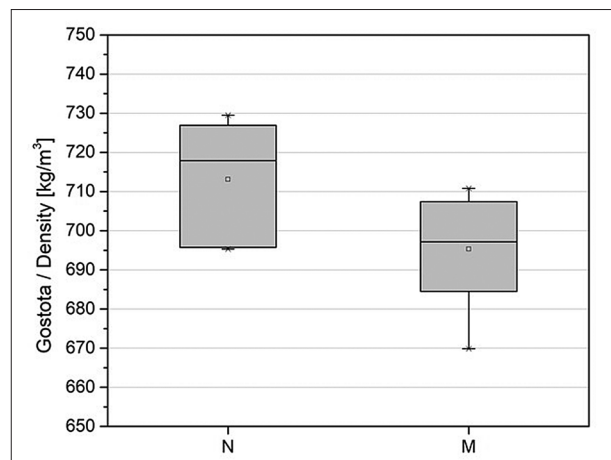
3 REZULTATI IN RAZPRAVA

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.

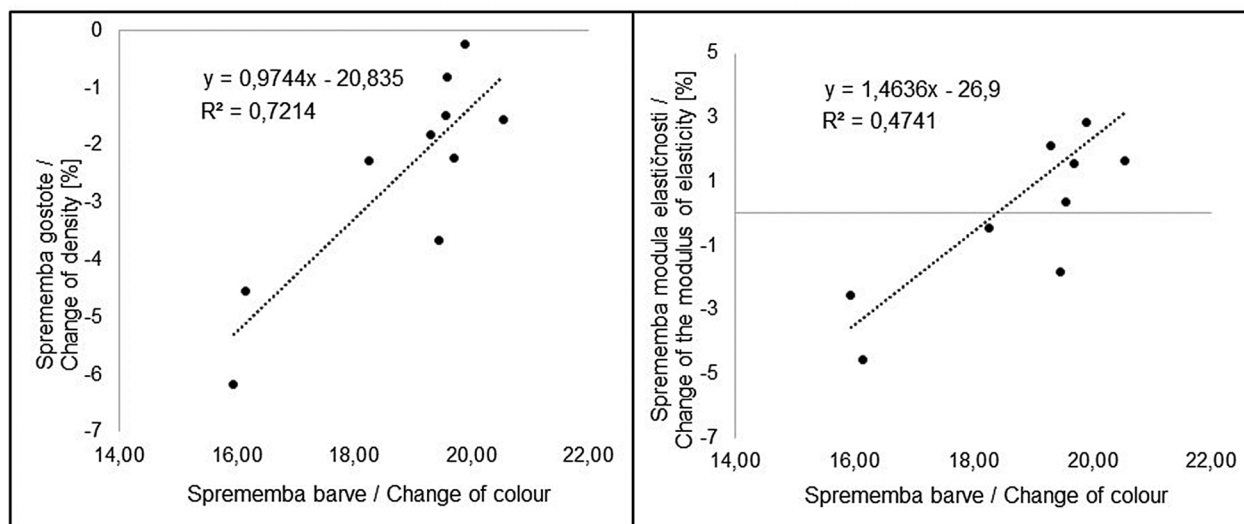
	Hitrost zvoka / Speed of sound [m/s]			Modul elastičnosti / Modulus of elasticity [GPa]			Anizotropija hitrosti zvoka / Anisotropy of the speed of sound			Anizotropija modula elastičnosti / Anisotropy of the modulus of elasticity		
	v_L	v_R	v_T	E_L	E_R	E_T	v_L/v_R	v_L/v_T	v_R/v_T	E_L/E_R	E_L/E_T	E_R/E_T
*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

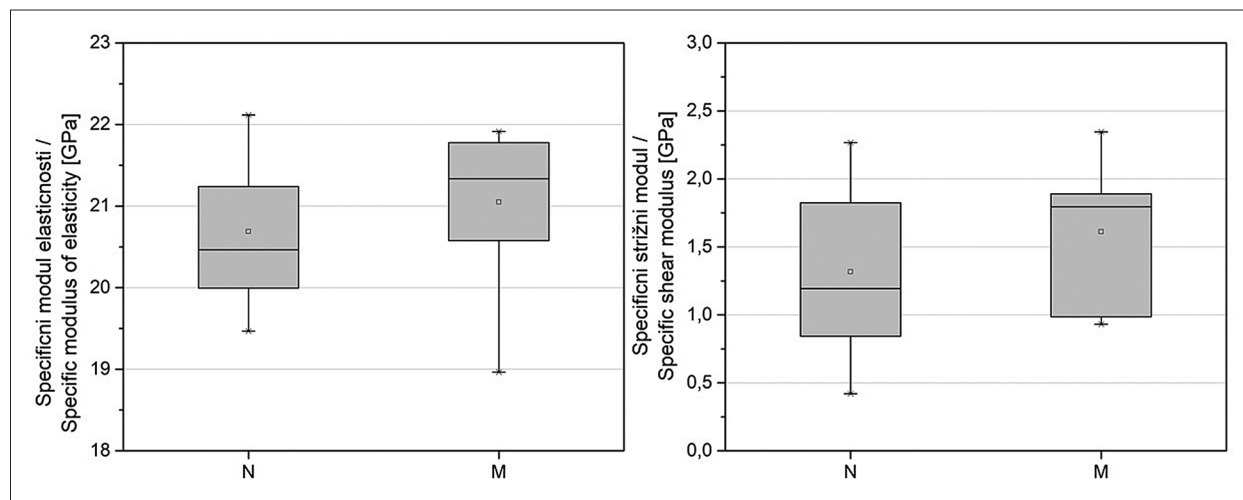
3.2 ACOUSTIC PARAMETERS

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 povišala

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

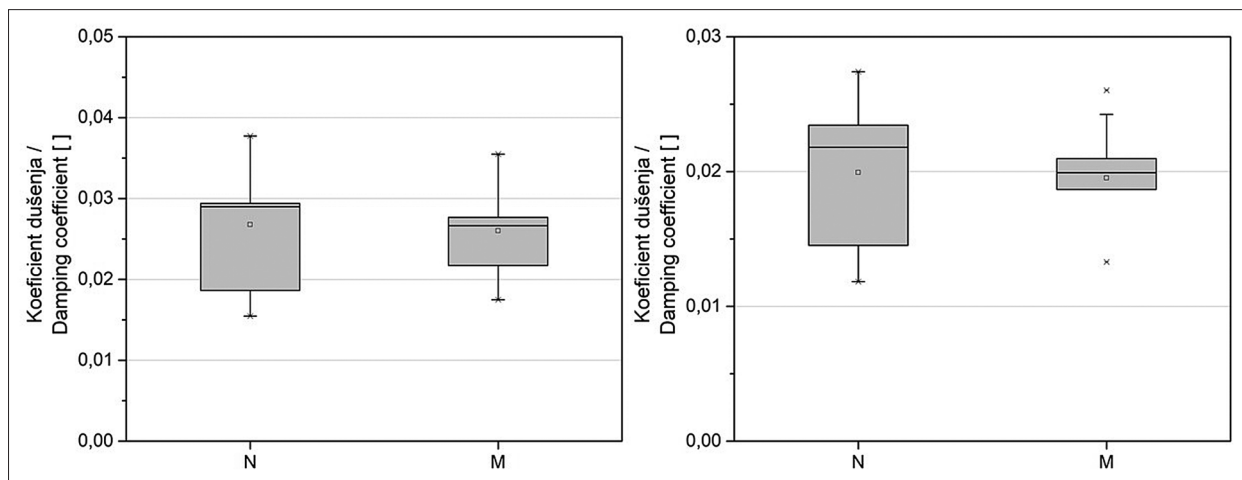
Oba specifična modula sta neposredno povezana z akustičnimi kazalniki, predstavljenimi v nadaljevanju. Njuno izboljšanje je šibko, s čimer ne moremo z gotovostjo napovedati izboljšanja kakovosti akustičnih lastnosti hidrotermično obdelane bukovine po tem postopku. S tem procesom pa kot kaže značilno 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).



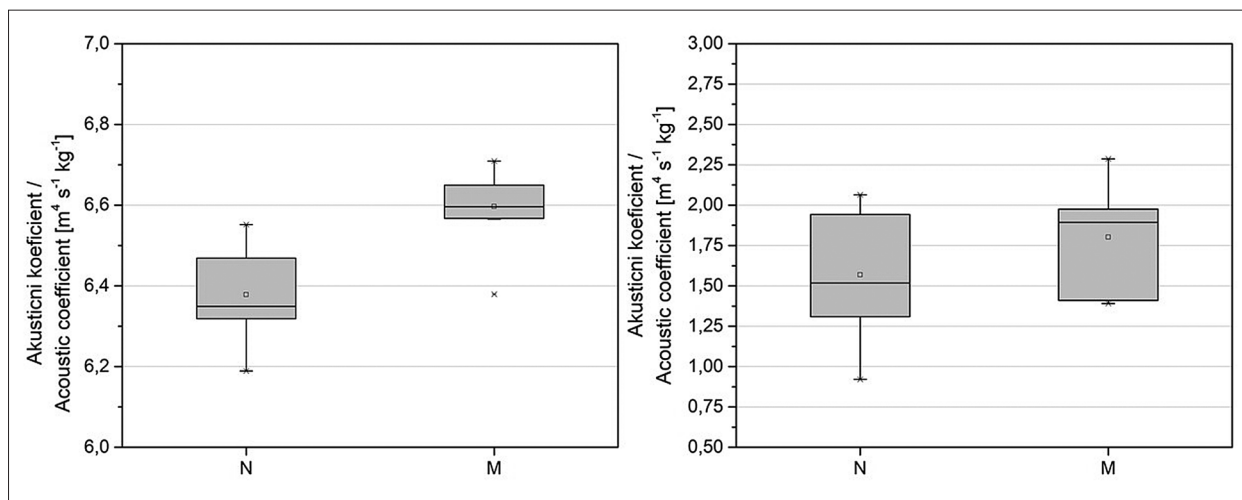
Slika 6. Koefficient dušenja prečnega (levo) in torzijskega nihanja (desno) naravne (N) in hidrotermično obdelane bukovine (M).

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

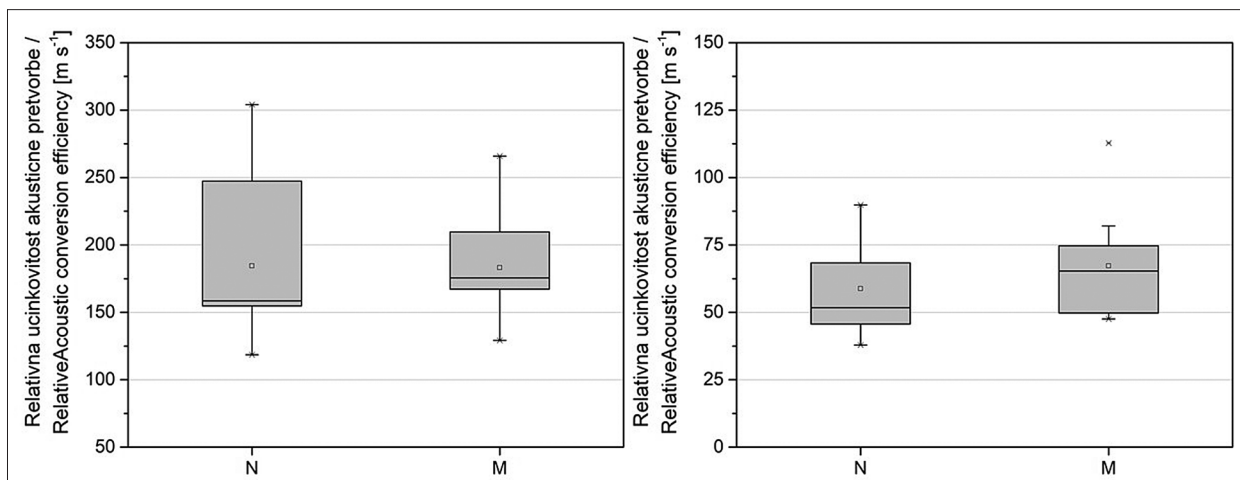
specifični modul elastičnosti upada, narašča pa dušenje.

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).

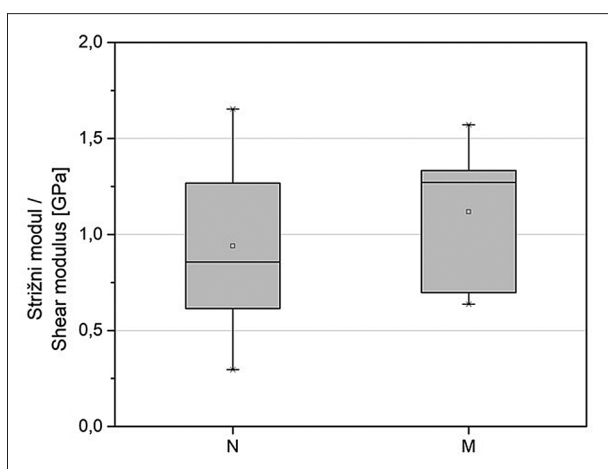
Figure 8. Relative acoustic conversion efficiency transformation (RACE) for transverse (left) and torsional vibration (right) of untreated (N) and hydrothermally-treated beech wood (M).

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 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 sovпада 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 bukovega 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., & Baillères, 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. *Osebná 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.



WOOD FORMATION IN NORWAY SPRUCE ON A LOWLAND SITE IN SLOVENIA IN 2015 AND COMPARISON WITH OTHER CONIFERS ALL OVER EUROPE

NASTAJANJE LESA SMREKE NA NIŽINSKEM RASTIŠČU V SLOVENIJI V LETU 2015 IN PRIMERJAVA Z IGLAVCI PO EVROPI

Fernando Useros¹, Angela Balzano², Peter Prislan³, Martin de Luis⁴, Jožica Gričar³, Maks Merela²,
Katarina Čufar^{2*}

UDK 630*811.13:174.7 (*Picea abies* L. Karst.)

Abstract / Izvleček

Original scientific article / Izvirni znanstveni članek

Abstract: We present xylem formation in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in 2015 at Panška reka, near Ljubljana, Slovenia (ca. 46°00'N, 14°40'E, 400 m a.s.l.) with a temperate climate. The research was a part of a long-term project, which involves different sites and tree species. We measured the widths of cambium and the formation of xylem growth rings with differentiating cells in postcambial (PC) and secondary wall formation (SW) phases, and mature cells (MT). The results for 2015 were compared with those for previous years (2009–2011) in the same species and site, and with the published data from wood formation studies in conifers from all over Europe. The latter were used in two-factor regression models which confirmed the effects of latitude and altitude on the critical dates of onset, end, and duration of xylem production. The models thus helped us to predict/reconstruct phenology of wood formation in conifers in Europe.

Keywords: Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.), phenology, cambium, xylogenesis, model, conifers, Europe

Izvleček: Študija prikazuje nastajanje lesa smreke (*Picea abies* (L.) Karst.) v rastni sezoni 2015 na rastišču Panška reka v bližini Ljubljane (približno 46°00'N, 14°40'E, 400 m n.v.). Raziskava je del večletnega projekta spremljanja nastajanja lesa več drevesnih vrst na različnih rastiščih. V okviru raziskave smo spremljali širino kambijeve cone ter nastajajoče branike lesa, kjer smo ločili celice v fazah postkambialne rasti (PC) in nastajanja sekundarne celične stene (SW) ter zrele (MT) celice. Rezultate smo primerjali z ugotovitvami študije, opravljene na smreki z istega rastišča v rastišnih sezonah 2009–2011 ter s podatki, objavljenimi za več vrst iglavcev z različnih rastišč po Evropi. Primerjave smo uporabili za izdelavo regresijskih modelov z dvema neodvisnima spremenljivkama. Modeli so potrdili vpliv zemljepisne širine in nadmorske višine na kritične datume začetka in konca ter na trajanje nastajanja lesa. Modeli so omogočili rekonstrukcijo fenologije nastajanja lesa iglavcev po Evropi.

Glavne besede: smreka (*Picea abies* (L.) Karst.), fenologija, kambij, ksilogeneza, modeliranje, iglavci, Evropa

1 INTRODUCTION

1 UVOD

Wood production (xylogenesis) is closely related to the function and survival of trees and forest ecosystems (Cuny et al., 2012). It is also linked to

long-term carbon sequestration, and has a great impact on terrestrial ecosystems (Cuny et al., 2015). Variability and potential changes in the wood formation process thus have ecological and economic implications. Wood, or secondary xylem, is an important tree tissue, with mechanical and physiological functions (Wilson & White, 1986; Cuny et al., 2014). It is produced by cell division in cambium, which is a secondary meristem that produces secondary xylem and secondary phloem. Axial tracheids are the main cells in secondary xylem of conifers. After their formation, tracheids undergo the process of differentiation with the phases of (I) cell enlargement, (II) wall deposition and lignification and (III) programmed cell death (Plomion et al., 2001).

¹ University of Alicante, Faculty of Sciences, Road of San Vicente del Raspeig s/n, 03690 San Vicente del Raspeig, Alicante, Spain

² University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenia

* e-mail: katarina.cufar@bf.uni-lj.si

³ Slovenian Forestry Institute, Večna pot 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenia

⁴ University of Zaragoza, Department of Geography, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, Spain

Secondary meristems are highly plastic. They can respond to environmental stimuli and allow modifications of the plant morphology during its life-cycle in order to adapt to the local conditions (Gričar et al., 2014). Plants try to maximize the use of resources while minimizing the effects of various harmful events. Growth occurs when the conditions are favourable (Cuny et al., 2012). In temperate and boreal biomes, cold temperatures are the main limiting factor of growth (Rossi et al., 2008), and cambium is usually active from spring until autumn, with a shorter growth period in boreal ones. Wood increment is deposited in the form of annual growth rings, with clear growth ring boundaries, which are studied in disciplines like dendrochronology (e.g., Novak, 2016; Wilson & White, 1986). Besides temperature, precipitation, photoperiod and other factors also affect wood formation. A lack of water is, for instance, the main factor impacting growth in xeric ecosystems, while fires, attacks by parasites or herbivores, air pollution or human activity are also important (Novak, 2016; de Luis et al., 2011). All these factors impact the physiological and structural properties of wood, which are important for its use (Humar et al., 2008; Wilson & White, 1986). Therefore, understanding the wood formation process and the factors influencing it can help us predict the performance and survival of trees as well as the properties of the related wood.

Many of the mentioned factors, especially the climatic ones, are influenced by the latitude and altitude of the sites where the trees grow. Martinez del Castillo et al. (2016) showed a clear negative relation between latitude and xylogenesis duration in *Fagus sylvatica* (shorter at lower latitudes) and *Pinus sylvestris* (higher at lower latitudes). Altitude also affects the growth, especially through duration of xylogenesis (Rossi et al., 2008; Coccozza et al., 2016). Understanding relationships between xylem formation phenology and intra-annual climatic/weather conditions could help us to better understand the potential of species to adapt to future climate conditions.

Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) is a species whose wood formation dynamics has been investigated on a great variety of sites in Europe. The natural area of this species is mainly in the NE boreal zone and mountainous areas of Europe (EUFORGEN, 2009). Since the 18th century it has been widely cul-

tivated for timber production all over Europe, also outside its natural range, such as on the lowland sites in Slovenia (Zavod za gozdove Slovenije, 2017).

In Slovenia spruce has a great importance from both economic and ecological perspectives (Brus, 2012; Caudullo et al., 2016). Its phenology is affected by climatic change which is in Slovenia mainly characterized by increasingly mild winters which favour the early onset of spring phenology (Čufar et al., 2008, 2012; de Luis et al., 2014), frosts which often interrupt spring phenology (Sinjur, 2017), as well as increasing temperatures with hot spells and frequent drought periods during the vegetation period (Cegnar, 2015 a, b).

The objective of this study was to investigate the wood formation and dynamics of cambial activity in *Picea abies* on a site near Ljubljana, Slovenia in 2015. The second objective was to compare the obtained results with the published data from wood formation studies in *Picea abies* and other conifers from all over Europe, and to apply models to evaluate the effects of latitude and altitude and to predict/reconstruct phenology of wood formation in conifers in Europe.

2 MATERIALS AND METHODS

2 MATERIAL IN METODE

2.1 STUDY SITE, TREES, TISSUES AND ANALYSES

2.1 RASTIŠČA, DREVESA, TKIVA IN ANALIZE

The dynamics of xylem production were studied in six mature Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) trees growing at Panška reka, near Ljubljana (ca. 46°00'N, 14°40'E, 400 m a.s.l.). The site is a mixed forest of the Hacquetio-Fagetum typicum type, containing mainly *Fagus sylvatica*, *Acer pseudoplatanus* and *Picea abies*, with dolomites as the predominant rock type in the area (Gričar et al., 2014). The climate at the site is temperate humid. The site is included in the long-term monitoring of xylem and phloem formation and cambial activity in different species and sites which started in 2006 (Čufar et al., 2015).

The microcores were collected from the stems at 1.1–1.7 m above ground from March until October 2015. The methodology of sample collection and tissue preparation followed the procedure described by Prislan et al. (2014). According to this methodology,

the micro cores were collected with a Trephor tool at weekly intervals, fixed in a solution of ethanol, formalin and acetic acid, and then stored in ethanol. Afterwards, the microcores were trimmed, dehydrated in a graded series of ethanol, infiltrated with D-limonene and paraffin, and embedded in paraffin blocks. The 9 µm thick transverse sections were cut, transferred to object glasses, stained with safranin and astra blue and embedded in Euparal. The tissues were observed with a Nikon Eclipse E800 light microscope, and analysed with the NIS Elements image analysis program.

We measured the width (in µm) and counted the number of cells in different tissue portions: cambium (CC), current xylem increment with postcambial cells (PC), cells in the phase of secondary cell wall deposition and lignification (SW) and mature (MT) xylem cells (Fig. 2). We also measured/counted the width and cell number in the three previous xylem rings.

2.2 DATA PROCESSING

2.2 OBDELAVA PODATKOV

For each tree and date, measurements were taken along three radial rows and then averaged. To study the behaviour of the trees as a whole population we performed quality control of the data, which showed that two of six trees contained numerous anomalies due to wounding, therefore we averaged the data of four trees and calculated the basic statistics.

The data were then processed by using the R package "CaviaR" (Rathgeber et al., 2011). The Gompertz function was fitted to the data to describe the production of new cells in the wood (Rossi et al., 2003):

$$N(t) = A \cdot e^{-e^{\beta - kt}}$$

where $N(t)$ is the number of tracheids (all phases) at a given time t ; A the upper asymptote, indicating the final number of tracheids; β the x-axis placement parameter, reflecting time 0; and k the rate of change parameter, which determines the spread of the curve.

We also used CaviaR for determining the critical dates of xylogenesis: onset, cessation and duration of PC, SW and MT phases of xylem formation (Rathgeber et al., 2011).

2.3 CLIMATIC DATA

2.3 KLIMATSKI PODATKI

Monthly sums of precipitation as well as minimum and maximum mean temperatures from 1974 until 2015 were obtained using KNMI Climate explorer (Trouet & Van Oldenborgh, 2013). The station found by the gridded system was situated at 45°30' -46°N and 14°30'-15°E. Comparing the data of 2015 with the average data of the previous 30 years, we noticed an increase in the average minimum and maximum temperatures during summer and winter months, and a noticeable decrease in the precipitation of March and April (Figure 4).

In addition, we also collected daily climatic data for 2015 from the Grosuplje meteorological station (45°58'N, 14°39'E, 350 m a.s.l.) located near the forest site using the website of the Slovenian Environment Agency (ARSO) (meteo.si), and checked the reports on climatic characteristics for the year 2015 in Slovenia (Cegnar, 2015 a, b).

2.4 EFFECTS OF LATITUDE AND ALTITUDE ON PHENOLOGY OF XYLOGENESIS

2.4 VPLIV ZEMLJEPISENE ŠIRINE IN NADMORSKE VIŠINE NA FENOLOGIJO NASTAJANJA LESA

To place the wood formation data of *Picea abies* at Panška reka in 2015 in a wider context, we compared them with the published data on conifers growing on a wide range of sites all over Europe. We collected the data on onset, cessation and duration of xylem production from 47 studies involving *Picea abies* and seven other coniferous species growing at latitudes ranging from 38.1 to 68.5°N and altitudes from 15 to 2156 m a.s.l. (Table 3).

Using the R package "lme4" we used two-factor linear regression models to check the correlation of latitude, altitude and their interaction with the dates of onset, end, and duration of the cell production. Variables were selected using a stepwise process. Absence of significant autocorrelation in the residuals was checked with the Durbin-Watson test. We calculated the models with the dependent variable unchanged, transformed logarithmically, and square rooted, and then chose the one with better fitting (using AIC criteria). Finally, we applied the obtained models to the whole European continent and mapped the predicted values of onset, end and duration of the cell production (Rossi et al., 2011).

3 RESULTS AND DISCUSSION

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3.1 WOOD FORMATION IN SPRUCE AT PANŠKA REKA IN 2015

3.1 NASTAJANJE LESA SMREKE NA PANŠKI REKI LETA 2015

Assessment of cambial activity was based on number of cambial cells (CC) (Figure 1, Figure 2a). We recorded 5.11 ± 0.69 CC on 10 April (DOY 100). Afterwards, the number of CC increased and showed a peak in the second week of May (8.22 ± 3.09 cells) and another in the second week of July (7.55 ± 0.60 cells). Thereafter the number of CC decreased (Figure 2a).

The first postcambial cells (PC) which indicate the onset of wood production were observed on 24 April (DOY 114) (Figures 2b, 3). The maximum number of PC cells was observed from the end of May to the first weeks of June. In most trees PC production finished between 24 August and 5 September (DOY 236-248). However, in some samples individual PC cells could be observed until the end of the sampling period in October 2015 (Figure 2b).

The first SW cells, undergoing secondary cell wall deposition and lignification, were observed between 12 and 23 May (DOY 132-143) (Figures 1, 2c). Between 28 May and 9 June (DOY 148-160) we observed the first fully mature MT cells (Figures 1, 2d).

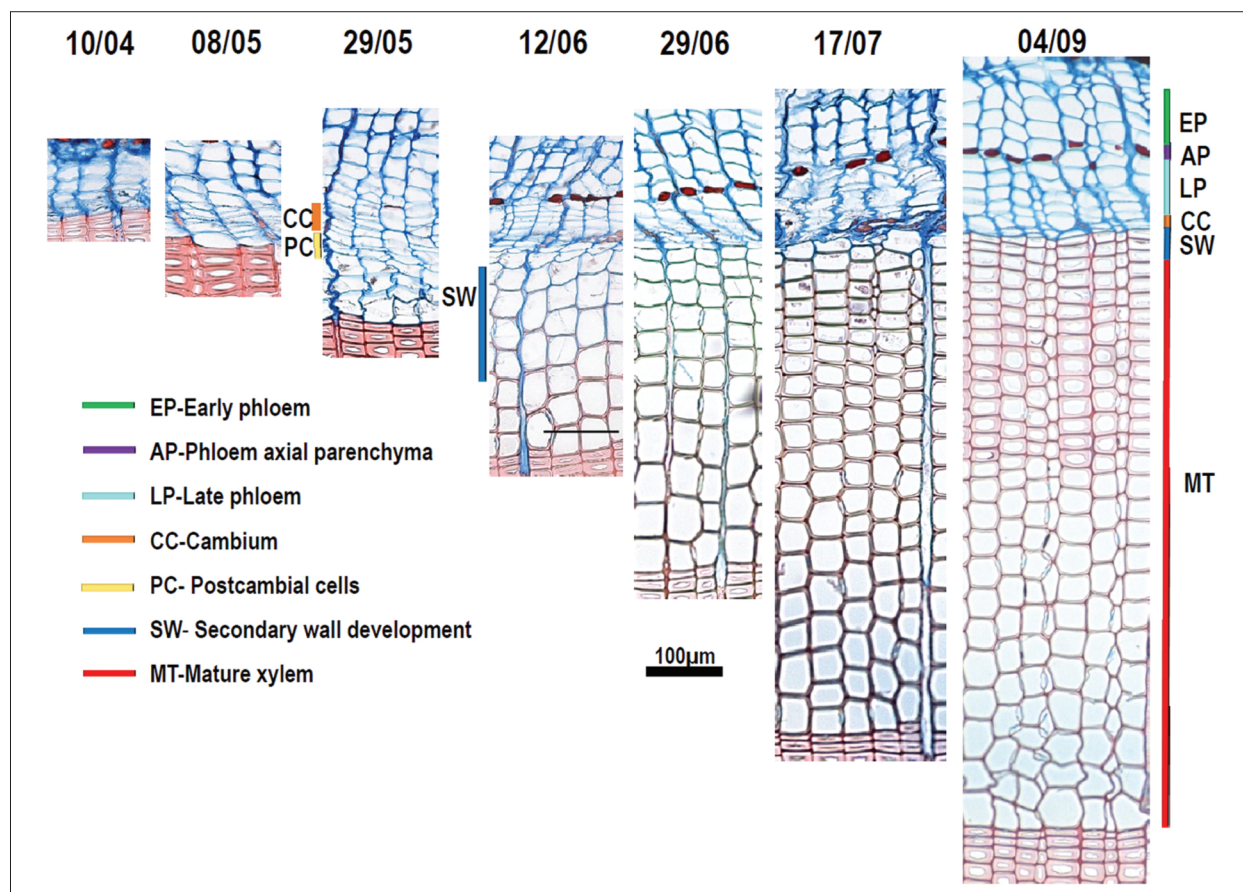


Figure 1. Cross-sections of Norway spruce (*Picea abies*) tissues on different dates of the year in 2015 at Panška reka site near Ljubljana with varying numbers of cambial cells (CC), cells of secondary xylem in various phases of differentiation (PC and SW), and mature cells (MT). The newly formed secondary phloem increment consists of varying portions of early (EP) and late (LP) phloem, divided by axial parenchyma (AP).

Slika 1. Prečni prerezi tkiv smreke (*Picea abies*) z rastišča Panška reka v okolici Ljubljane na različne datume v letu 2015. Opazujemo lahko različno število celic v kambiju (CC) in nastajajoči braniki lesa, kjer je mogoče ločiti celice v različnih fazah diferenciacije (PC in SW) in zrele celice (MT). Novo nastali floem vsebuje različne deleže ranega (EP) in kasnega (LP) floema, ki ju razmejuje aksialni parenhim (AP).

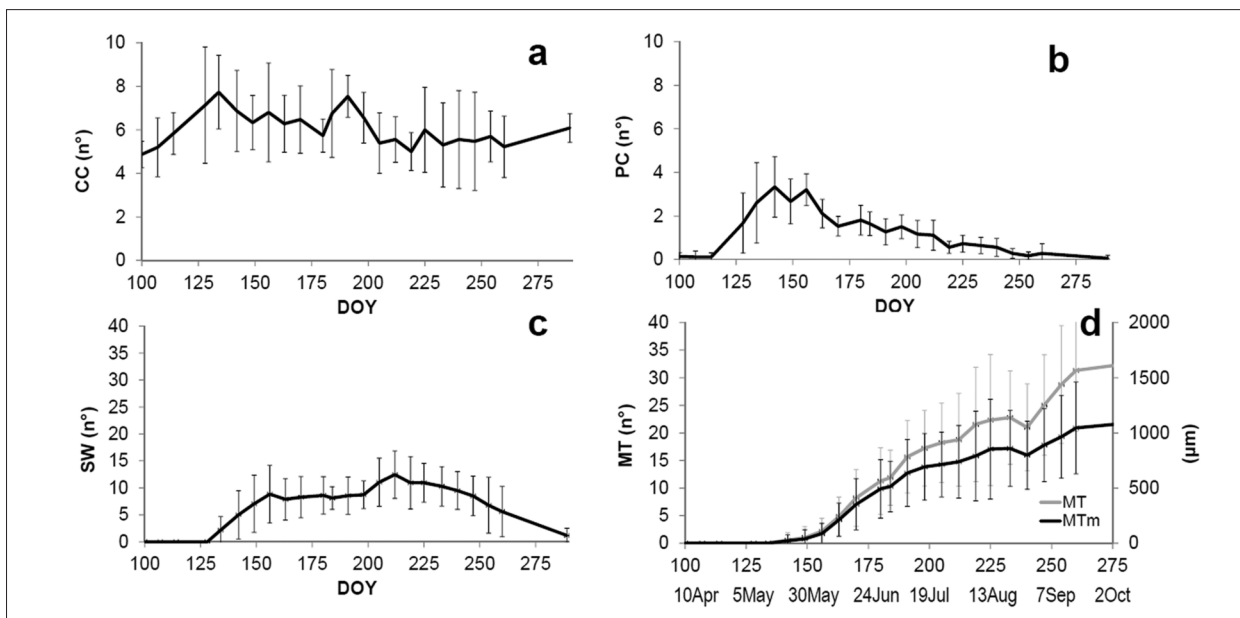


Figure 2. Average number of cells or widths of differentiating and mature xylem in Norway spruce (*Picea abies*) from Panška reka near Ljubljana on different days of the year (DOY) in 2015: (a) cambial cells (CC), (b) xylem cells in post-cambial growth (PC), (c) xylem cells in phase of secondary cell wall deposition and lignification (SW), and (d) mature xylem (MT) expressed in number of cells (MT-gray line) and micrometers (MTm-black line) and time expressed in DOY and calendar dates. Lines represent the average of four trees, and bars show standard deviations.

Slika 2. Povprečno število celic oz. širine diferencirajočega in zrelega lesa nastajajoče branike smrek (*Picea abies*) na Panški reki v bližini Ljubljane v letu 2015: (a) kambijeve celice (CC), (b) ksilemske celice v fazi post-kambialne rasti (PC), (c) ksilemske celice v fazi odlaganja sekundarne celične stene in lignifikacije (SW) in (d) zrele celice lesa (MT), izražene kot število celic (MT-siva črta) in širina v mikrometrih (MTm-črna črta). Grafi predstavljajo povprečne vrednosti podatkov za 4 drevesa, ročaji prikazujejo standardni odklon. Podatki so prikazani za različne dneve v letu (DOY), na (d) pa so pod DOY pripisani tudi koledarski datumi.

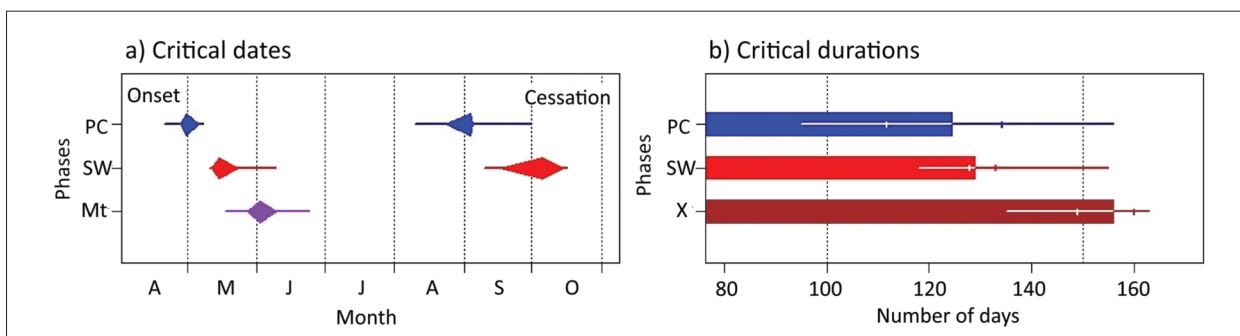


Figure 3. Critical dates for (a) onset and cessation of wood differentiation phases and (b) their duration. PC: xylem cells in post-cambial growth, SW: secondary cell wall deposition and lignification, MT mature cells, X: duration of xylogenesis. In (a) the ends of the line indicate maximum and minimum values, the corners of the diamond the first and third quartiles, and the middle of the diamond the median. In (b) different points on the line represent, minimum, Q1, median, Q3 and maximum duration.

Slika 3. Kritični datumi za (a) začetek in zaključek faz PC, SW in MT ter (b) njihovo trajanje. PC: celice lesa v postkambialni rasti, SW: razvoj sekundarne celične stene in lignifikacija, MT: zrele celice, X: trajanje nastajanja lesa. Na grafu (a) konca črt kažeta maksimalne in minimalne vrednosti, vogali romba predstavljajo prvi in tretji kvartil (Q1 in Q3), sredina romba pa mediano. V grafu (b) točke na črti prikazujejo minimalno, Q1, mediano, Q3 in maksimalno trajanje posamezne faze.

Table 1. Parameters calculated with the Gompertz function showing averages and standard deviation (SD) for four trees. Dt90 indicates the number of days needed to produce from 5% to 95% of the xylem ring. r90 is the average growth rate (cells/day) in that period and rmax the maximum growth rate.

Preglednica 1. Parametri, izračunani s pomočjo Gompertzove funkcije, ki kažejo povprečja in standardne odklone (SD) štirih dreves. Dt90 prikazuje število dni, potrebnih za nastanek od 5 % do 95 % celotne branike. r90 je povprečni prirastek (celic/dan) v tem obdobju in rmax je maksimalni prirastek.

	A	β	k	tip	Dt90	r90	rmax	R2
Average	43.59	5.32	0.035	154.75	124.75	0.32	0.53	0.913
SD	10.90	1.28	0.010	8.26	35.98	0.06	0.088	0.075

Differentiation of the cells was completed by mid-September to mid-October (Figures 2c, d, 3). The final xylem growth ring of 2015 was on average 1468 μm wide and composed of 37 cells (Figure 2d).

Additional parameters of wood formation dynamics in 2015, as calculated by the Gompertz function, showed that the trees on average needed 125 days to produce 90% of the growth ring, produced 0.32 cells per day, and that the maximum production was 0.53 cells per day (Table 1).

3.2 WOOD FORMATION IN 2015 COMPARED TO THAT OF PREVIOUS YEARS

3.2 NASTAJANJE LESA V LETU 2015 V PRIMERJAVI S PREDHODNIMI LETI

As the wood formation has been followed over a longer period in *Picea abies* at Panška reka (Gričar et al., 2014, 2015; Čufar et al., 2015), the results for 2015 could be compared to those available for 2009, 2010 and 2011, while the data for 2012, 2013, and 2014 are still being processed. The comparison showed (Table 2) that on average xylem cell production in 2015 started five-11 days later than in pre-

vious years (2009–2011). On the other hand, maximum cell production and cessation of cell production occurred at approximately the same time as in previous years. Consequently, the duration of cell production was shorter and the tree ring was narrower in 2015 than in 2009, 2010 and 2011.

Later onset of cell production in 2015 could possibly be due to extremely low precipitation in March and especially April 2015, which were below the average of the last 30 years and lower than in the years 2009, 2010, and 2011 (Figure 4). Although previous investigations mainly confirmed the importance of spring temperatures for the onset of cambial production in spruce (Gričar et al., 2006, 2014, 2015), the extremely dry conditions in March and April 2015 could be a reason for the later onset of wood production. According to published reports on the climatic characteristics of 2015, it should also be noticed that summer was particularly warm, with five heat waves with daily temperatures of above 30 °C (Cegnar, 2015 a, b). Due to this, more detailed studies are needed to clarify the effects of high temperatures on the phenology of wood formation.

Table 2. Parameters of xylogenesis for Norway spruce (Picea abies) at the forest site Panška reka, near Ljubljana, Slovenia in 2015 compared with the published data for previous years (Gričar et al., 2014).

Preglednica 2. Kazalniki nastajanja lesa smreke (Picea abies) na Panški reki v bližini Ljubljane (Slovenija) v letu 2015 in primerjava z razpoložljivimi podatki, objavljenimi za predhodna leta (Gričar et al., 2014).

	2009	2010	2011		2015
Onset of cell production (DOY)	106.17±4.58	109.00±0	103.17±2.86		114.00±0.00
Maximal cell production (DOY)	154.15±5.24	157.91±10.77	164.11±22.41		154.75±8.26
Cessation of cell production (DOY)	243.00±14.68	243.17±8.18	237.50±17		241.50±15.83
Duration of cell production (days)	136.83±15.38	134.17±8.18	134.33±19.63		124.75±35.98
Number of cells in final xylem ring	68.66±31.72	55.47±12.38	63.49±27.37		37.50±13.77

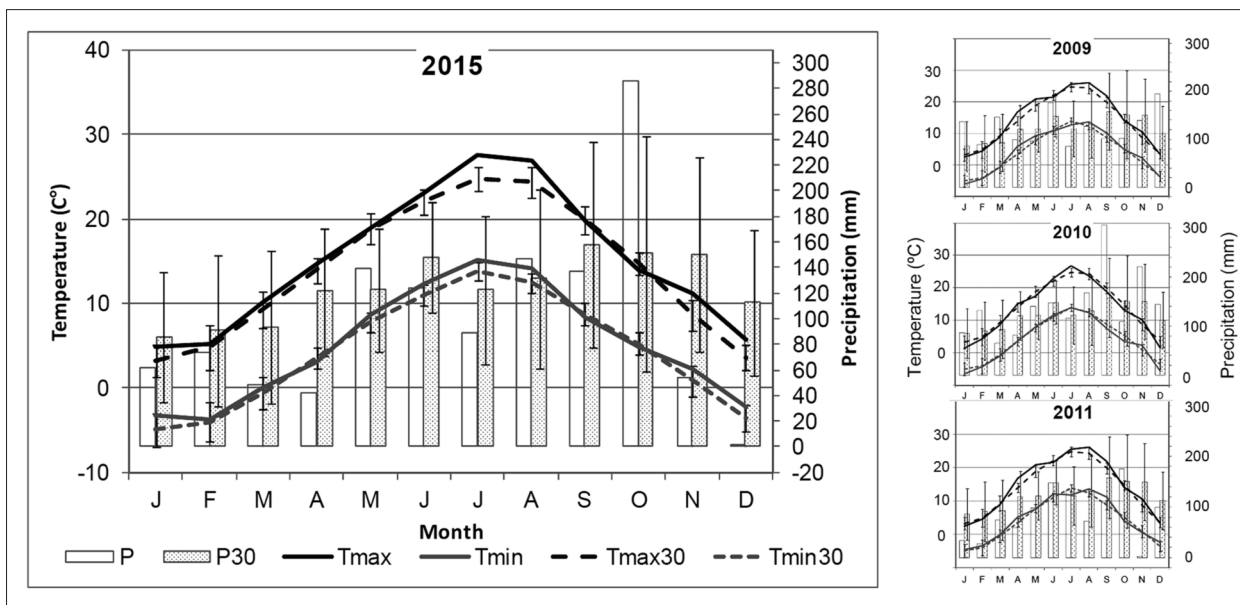


Figure 4. Monthly sum of precipitation (P) and average minimum and maximum temperatures (Tmin and Tmax) in 2015 and 2009–2011, compared with the averaged 1974–2015 data (P30, Tmin30, Tmax30), with the standard deviation represented by error bars. Source: KNMI Climate explorer (Trouet & Van Oldenborgh, 2013).

Slika 4. Mesečne padavine (P) in povprečne minimalne in maksimalne temperature (Tmin in Tmax) v letih 2015 in 2009–2011 v primerjavi s povprečnimi vrednostmi za obdobje 1974–2015 (P30, Tmin30, Tmax30). Ročaji prikazujejo standardni odklon. Vir: KNMI Climate explorer (Trouet & Van Oldenborgh, 2013).

3.3 COMPARISON OF XYLEM PHENOLOGY ON DIFFERENT SITES - EFFECT OF LATITUDE AND ALTITUDE

3.3 PRIMERJAVE FENOLOGIJE NASTAJANJA LESA MED RASTIŠČI – VPLIV ZEMLJEPISENE ŠIRINE IN NADMORSKE VIŠINE

Although the results obtained for one year and location provide valuable insights into the wood formation process, we wanted to relate these findings to wood formation data for a larger sample from the

published literature (Table 4). As *Picea abies* mainly grows on higher elevations and latitudes (EUFORGEN, 2009), and its wood formation data cover latitudes from 45.93 to 67.50°N, we collected also the data of other conifers (mainly *Pinus* sp.) to widen the interval to 38.10 – 68.5°N and altitudes from 15 to 2156 m a.s.l. The collected data showed high variability of onset (DOY 47 – 168, 16 February–17 June), cessation (DOY 198–334, 17 July–30 November) and duration (49–287 days) of wood production (Table 4).

Table 3. Models showing the effects of latitude (l) and altitude (a) on phenology (onset, end and duration) of wood production.

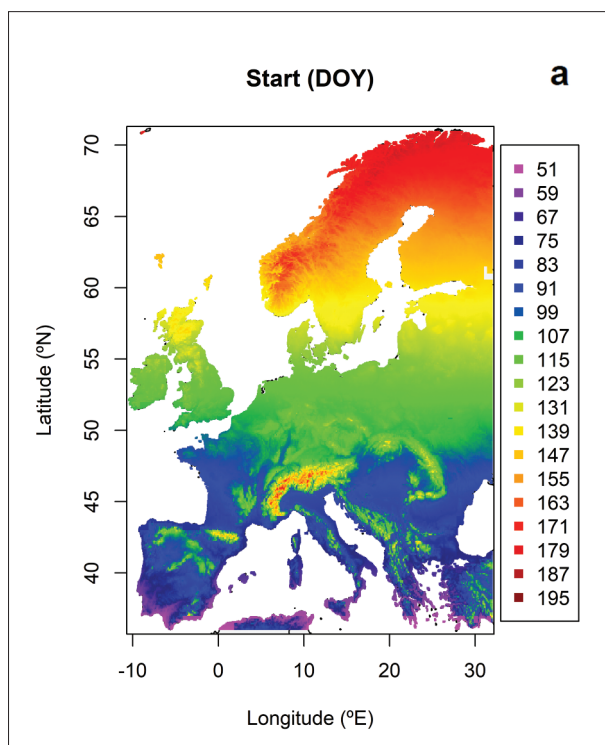
Preglednica 3. Modeli, ki prikazujejo vpliv zemljepisne širine (l) in nadmorske višine (a) na fenologijo (začetek (onset), konec (end) in trajanje (duration)) kambijeve produkcije celic lesa.

Model	Onset DOY = $3,6447 l + 0,0289 a - 77,3589$	End DOY = $365,515 - 2,2280 l - 0,0218a$	$\text{Log}(\text{Duration}) =$ $1,008 \cdot 10^{-5} l * a - 2,574 \cdot 10^{-2} l - 6,525 \cdot 10^{-4} a + 3,428$
R2	0.8275	0.3810	0.803
p-value	$2.2 \cdot 10^{-16}$	$9.84 \cdot 10^{-6}$	$7.1 \cdot 10^{-16}$
F	111 on 2 and 44 DF	15.15 on 2 and 44 DF	63.8 on 3 and 43 DF

Table 4. Onset, cessation and duration of cambial cell production in *Picea abies* and other conifers from various sites in Europe used for the regression models.

Preglednica 4. Podatki o začetku, koncu in trajanju kambijeve celične produkcije smreke in drugih iglavcev na različnih rastiščih po Evropi, ki so bili uporabljeni v regresijskem modelu.

Species	Country	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Altitude (m a.s.l.)	Onset (DOY)	End (DOY)	Duration (days)	Reference
<i>Picea abies</i>	Slovenia	46.00	14.65	400	114	241	125	This study
<i>Picea abies</i>	Italy	45.93	11.05	680	106	258	152	Cocozza et al., 2016
<i>Picea abies</i>	Slovenia	46.18	14.38	392	126	225	99	Rossi et al., 2008
<i>Picea abies</i>	Slovenia	46.27	16.80	1200	117	228	111	Gričar et al., 2014
<i>Picea abies</i>	Slovenia	46.35	13.97	1280	144	221	77	Rossi et al., 2008
<i>Picea abies</i>	Italy	46.35	11.48	1780	168	256	88	Cocozza et al., 2016
<i>Picea abies</i>	Italy	46.45	12.13	2156	157	225	68	Rossi et al., 2008
<i>Picea abies</i>	Italy	46.45	12.13	2085	155	233	78	Rossi et al., 2008
<i>Picea abies</i>	Austria	47.23	10.84	750	119	238	119	Swidrak et al., 2014
<i>Picea abies</i>	France	48.48	7.15	643	122	221	99	Cuny et al., 2012
<i>Picea abies</i>	Czech Rep.	49.29	16.67	650	112	232	120	Gričar et al., 2014
<i>Picea abies</i>	Finland	60.20	25.00	60	152	229	77	Jyske et al., 2014
<i>Picea abies</i>	Finland	60.20	25.00	60	142	232	90	Jyske et al., 2014
<i>Picea abies</i>	Finland	61.20	25.60	120	163	229	66	Jyske et al., 2014
<i>Picea abies</i>	Finland	61.20	25.60	120	163	237	74	Jyske et al., 2014
<i>Picea abies</i>	Finland	61.90	24.30	181	152	215	63	Jyske et al., 2014
<i>Picea abies</i>	Finland	61.90	24.30	181	147	217	70	Jyske et al., 2014
<i>Picea abies</i>	Finland	62.40	27.30	110	158	220	62	Jyske et al., 2014
<i>Picea abies</i>	Finland	62.40	29.40	84	159	217	58	Jyske et al., 2014
<i>Picea abies</i>	Finland	62.40	27.30	110	153	217	64	Jyske et al., 2014
<i>Picea abies</i>	Finland	63.00	29.50	183	166	216	50	Jyske et al., 2014
<i>Picea abies</i>	Finland	66.20	26.40	140	165	221	56	Jyske et al., 2014
<i>Picea abies</i>	Finland	66.20	29.50	140	168	226	58	Jyske et al., 2014
<i>Picea abies</i>	Finland	67.50	29.40	390	163	215	52	Jyske et al., 2014
<i>Pinus halepensis</i>	Spain	38.10	-0.65	15	47	334	287	de Luis et al., 2007
<i>Pinus halepensis</i>	Spain	38.52	-0.64	845	75	310	235	de Luis et al., 2011
<i>Pinus halepensis</i>	Spain	39.16	-1.15	850	93	198	105	de Luis et al., 2007
<i>Pinus leucodermis</i>	Italy	39.90	16.20	2053	155	220	65	Rossi et al., 2008
<i>Pinus sylvestris</i>	Spain	41.79	-1.82	1600	100	245	145	Martinez del Castillo et al., 2016
<i>Pinus sylvestris</i>	Spain	41.80	-1.81	1200	87	246	160	Martinez del Castillo et al., 2016
<i>Pinus sylvestris</i>	Austria	47.23	10.84	750	111	248	137	Gruber et al., 2010
<i>Pinus sylvestris</i>	Austria	47.23	10.84	750	119	279	160	Gruber et al., 2010
<i>Pinus sylvestris</i>	Austria	47.23	10.84	750	107	214	107	Oberhuber et al., 2011
<i>Pinus sylvestris</i>	Austria	47.23	10.84	750	108	236	128	Swidrak et al., 2014
<i>Pinus sylvestris</i>	France	48.40	6.32	270	111	259	148	Rathgeber et al., 2011
<i>Pinus sylvestris</i>	France	48.48	7.15	643	116	250	134	Cuny et al., 2014
<i>Pinus sylvestris</i>	Finland	66.37	26.72	150	160	219	59	Rossi et al., 2008
<i>Pinus sylvestris</i>	Finland	68.50	27.50	220	166	215	49	Rossi et al., 2008
<i>Pinus uncinata</i>	Italy	45.05	6.67	2030	143	204	61	Rossi et al., 2008
<i>Abies alba</i>	France	48.48	7.15	643	117	243	126	Cuny et al., 2012
<i>Larix decidua</i>	Italy	45.05	6.67	2030	155	208	53	Rossi et al., 2008
<i>Larix decidua</i>	Italy	46.45	12.13	2156	154	218	64	Rossi et al., 2008
<i>Larix decidua</i>	Italy	46.45	12.13	2085	150	226	76	Rossi et al., 2008
<i>Larix decidua</i>	Austria	47.23	10.84	750	120	217	98	Swidrak et al., 2014
<i>Pinus cembra</i>	Italy	45.05	6.67	2030	139	201	62	Rossi et al., 2008
<i>Pinus cembra</i>	Italy	46.45	12.13	2156	145	223	78	Rossi et al., 2008
<i>Pinus cembra</i>	Italy	46.45	12.13	2085	141	223	82	Rossi et al., 2008



The models applied to data obtained from 47 sites confirmed the statistically significant effects of latitude and altitude on the onset, cessation, and duration of xylem production (Table 3). Latitude and altitude both have a positive influence on the date of onset (higher latitude and altitude, later onset), and a negative one on the cessation date (higher latitude and altitude, earlier cessation). The correlations are higher for the onset than for the cessation of cell production.

Latitude proved to be the most important factor for explaining the variability in phenology of cell production in conifers on different sites. The effect of altitude proved to be important as well, but it only became evident after filtering the effect of latitude. Altitude therefore explained the residuals of the latitude model. As such, the model including both latitude and altitude gave the best predictions.

These results support the observation that temperature is likely the main determinant of the onset, cessation and duration of wood production in tem-

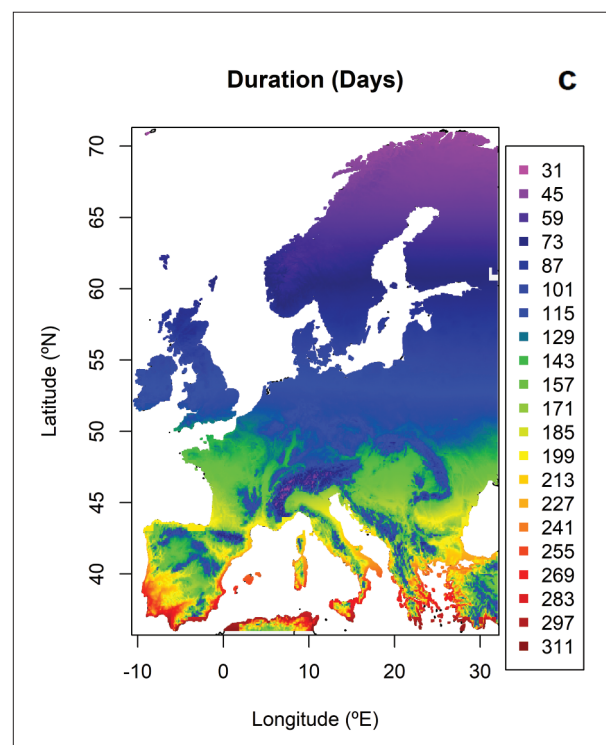
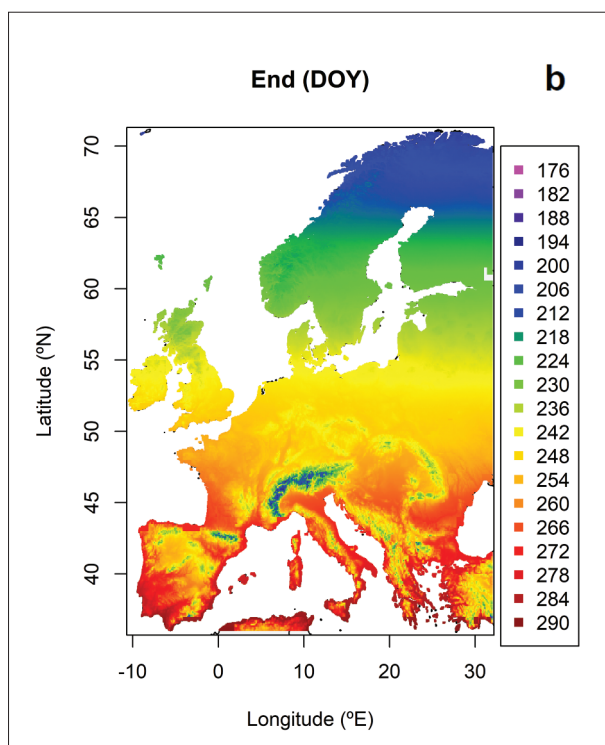


Figure 5. Maps of Europe showing predicted values for (a) onset - start, (b) cessation – end, and (c) duration of cell production in wood according to the two-factor, altitude and latitude, regression models (see Tables 3 and 4).
Slika 5. Zemljevidi Evrope in napoved vrednosti za (a) začetek, (b) konec in (c) trajanje kambijeve produkcije celic lesa, izračunanimi s pomočjo dvofaktorskega regresijskega modela (faktorja: zemljepisna širina in nadmorska višina) (glejte tudi preglednici 3 in 4).

perate ecosystems, although extremely dry conditions during the spring may also affect the onset of this. Trees at different latitudes are adapted to local conditions, and mainly to the duration of the warm period (Rossi et al., 2006; Coccozza et al., 2016). These relations with temperature are highest for the onset of cell production, whereas cessation of cell production seems to be more dependent on individual factors (e.g. tree vitality, social status, soil properties, topography) and therefore shows a weaker correlation in the model. Increasing latitude and altitude also decrease the duration of cell production by the cambium.

These results confirm the high plasticity of *Picea abies* and other conifers, which allows them to adapt to the environmental conditions of a wide range of sites (Gričar et al. 2014, 2015; Martinez del Castillo et al., 2016). An increase in latitude is generally accompanied by a decrease in temperature and shorter duration of the warm period that allows growth. Variation in latitude also entails differences in day length (photoperiod), whereas variation in altitude in a particular area does not include this effect.

As we worked with data from various publications, it should be noted that the predictions may be less reliable in some areas, for instance in the Mediterranean, where the data are scarce, and lack of water availability is generally more important for limitation of growth than temperature (Novak et al., 2013).

4 CONCLUSIONS

4 ZAKLJUČKI

Xylogenesis in *Picea abies* at Panška reka near Ljubljana during 2015 followed the pattern which could be fitted to the Gompertz function. The characteristics of wood formation in 2015 were a delayed onset of cell production, shorter duration of cell production and narrower tree ring width compared to the years 2009, 2010, and 2011. This can possibly be ascribed to the very dry March and April in 2015, whereas this study could not explain the effects of that year's hot summer on the xylogenesis phases, with five heat waves having occurred.

Maximal tracheid production occurred around 4 June 2015 ($\pm$ ca. 1 week), which is comparable to the situation in 2009–2011 at the same site, and earlier than reported for conifers in colder climates,

which generally show maximal tracheid production around the summer solstice, i.e. 21 June (Rossi, 2006). The factors involved in cessation of cell production seem to be less evident than those involved in its onset.

Comparison of wood formation in *Picea abies* on the site near Ljubljana with the phenology of xylem production in the same species and other conifers (mainly *Pinus* sp.) all over Europe showed a significant correlation with latitude and altitude. An increase in latitude and altitude as a rule resulted in a delayed onset, earlier cessation and shorter duration of cambial production. Latitude proved to be more important for explaining the variability in phenology of cell production than the altitude.

This study is part of long-term monitoring project of wood formation in Slovenia, and shows that long-term observations of the same species and site are necessary to predict the intra-annual and inter-annual growth of trees, which is crucial for their survival and productivity in changing climate as well as for wood quality.

5 SUMMARY

5 POVZETEK

Vaskularni kambij je sekundarni meristem, ki proizvaja sekundarni ksilem (les) in sekundarni floem. Nastajanje lesa in floema sta osnovna procesa, potrebna za rast in preživetje dreves, kar posledično omogoča obstoj gozdnih ekosistemov. Nastajanje lesa (ksilogeneza) vpliva tudi na kroženje ogljika in na kakovost lesa. Kambijeva aktivnost in produkcija celic lesa sta odvisna od okoljskih dejavnikov. V zmernem podnebnem pasu temperatura in padavine pomembno vplivajo na kambijevo produktivnost. Kambij praviloma deluje periodično in je aktiven v toplejšem ter mirujoč v hladnejšem obdobju leta, zato v enem koledarskem letu praviloma nastane ena prirastna plast oz. branika lesa. Periodično letno priraščanje je osnova za dendrokronološke študije.

Namen te študije je bil proučiti dinamiko nastajanja lesa smreke (*Picea abies* (L.) Karst.) na rastišču Panška reka v bližini Ljubljane v letu 2015. Cilj je bil tudi primerjati pridobljene rezultate s podatki o nastajanju lesa v isti vrsti na istem rastišču v preteklih letih (2009–2011), ter s podatki o nastajanju lesa v

smreki in drugih iglavcih iz študij za rastišča po Evropi. Namen primerjave je bil preveriti vpliv zemljepisne širine in nadmorske višine na nastajanje lesa ter pripraviti model za napovedovanje ali rekonstrukcijo fenologije nastanka lesa iglavcev v Evropi.

Proces nastajanja lesa smo spremljali na 6 smrekah v rastni sezoni 2015 na Panški reki v bližini Ljubljane (pribl. 46°00'N, 14°40'E, 400 m n.m.v.). V ta namen smo od aprila do oktobra 2015 tedensko odzemali mikro izvrtke iz debel izbranih dreves na višini 1,1 m–1,7 m nad tlemi. Izvrtke smo fiksirali v raztopini formalina, očetne kisline in etanola (FAA), dehidrirali in prepojili s parafinom. Z rotacijskim mikrotomom smo odrezali 9 µm debele preparate prečnega prereza tkiv, jih obarvali s kombinacijo barvil safranin ter astra modro in jih vklopili v euparal (Prislan et al., 2014). Na izdelanih anatomskih preparatih smo vzdolž treh radialnih nizov merili in šteli celice kambija (CC), lesa nastajajoče branike ter predhodnih branik. V nastajajoči braniki smo razlikovali celice v fazi postkambialne rasti (PC), odlaganja in lignifikacije sekundarne celične stene (SW) in zrele celice (MT) (slika 1). Po opravljenih meritvah smo podatke preverili in zaradi rastnih anomalij izločili 2 vzorčni drevesi. Podatke smo statistično obdelali, za izravnavo podatkov pa smo uporabili tudi Gompertzovo funkcijo.

Vremenske razmere (mesečne padavine, minimalne ter maksimalne temperature) v letu 2015 smo primerjali z razmerami v obdobju 1974–2014. Za leto 2015 so bile značilne podpovprečne padavine v marcu in še posebej v aprilu ter nadpovprečne temperature pozimi in poleti (slika 4). Po nižinah je bilo leto 2015 drugo ali tretje najtoplejše v Sloveniji, poleti pa se je zvrstilo 5 vročinskih valov, ko so temperature dosegle vsaj 30 °C (Cegnar, 2015 a, b).

Ocena aktivnosti kambija je temeljila na številu celic v kambijevi coni (CC) (slika 1, slika 2a). 10. aprila (na 100. dan v letu, DOY) je število CC znašalo $5,11 \pm 0,69$. Potem se je število CC povečalo z vrhom v drugem tednu maja ($8,22 \pm 3,09$). Po drugem tednu julija, ko je število CC znašalo $7,55 \pm 0,60$, se je število začelo zmanjševati (slika 2a).

24. aprila (DOY 114) smo opazili prve celice v fazi postkambialne rasti (PC), kar je pomenilo, da se je začela kambijeva produkcija celic lesa (slika 2b, 3). Največje število PC celic smo opazili od sredine maja do prvih tednov junija. V večini dreves je bilo nastajanje PC končano med 24. avgustom in 5. septembrom

(DOY 236–248). Prve SW celice, kjer sta potekala odlaganje sekundarne celične stene in lignifikacija, smo opazili med 12. in 23. majem (DOY 132–143) (slika 1, 2c). Med 28. majem in 9. junijem (DOY 148–160) smo opazili prve popolnoma zrele MT celice (slika 1, 2d). Diferenciacija celic je bila zaključena od sredine septembra do sredine oktobra (slika 2c, d, 3). Povprečna ksilemska branika smreke v letu 2015 je bila široka 1468 µm in je vsebovala 37 celic – traheid v radialnem nizu (slika 2d). Parametri, izračunani s pomočjo Gompertzove funkcije, so pokazali, da so drevesa v povprečju potrebovala 125 dni, da so proizvedla 5 %–95 % branike; v povprečju so proizvedla 0,32 celice na dan, največja proizvodnja je znašala 0,53 celice na dan in je bila zabeležena 4. junija (DOY 154.75 ± 8.26) (preglednica 1 in 2).

Podatke nastajanja lesa smreke na Panški reki smo lahko primerjali z razpoložljivimi podatki iz predhodnih let za isto drevesno vrsto in rastišče (Gričar et al., 2014, 2015, Čufar et al., 2015). Primerjava je pokazala (preglednica 2), da se je proizvodnja ksilemskih celic v letu 2015 v povprečju začela 5–11 dni kasneje kot v predhodnih letih (2009–2011). Maksimum in zaključek produkcije celic smo v letu 2015 zabeležili ob približno istem času kot v predhodnih letih. Posledično je bilo trajanje produkcije celic krajše, branika 2015 pa je bila v splošnem ožja kot branike, nastale v letih 2009, 2010 in 2011.

Kasnejši začetek produkcije celic v letu 2015 bi bil lahko posledica suše v marcu in zlasti aprilu 2015, vpliva poletne vročine pa v tej študiji nismo mogli potrditi.

Modeli za obdelavo podatkov smreke in drugih iglavcev s 47 lokacij po Evropi so zajeli območje med 38.1° in 68.5° severne zemljepisne širine in nadmorske višine od 15 do 2156 m n.m.v. Potrdili so statistično značilen učinek zemljepisne širine in nadmorske višine na začetek, zaključek in trajanje kambijeve produkcije lesa (preglednica 3). Večja zemljepisna širina in višja nadmorska višina vplivata na poznejši začetek in bolj zgođen zaključek ter posledično na krajši čas kambijeve produkcije, kar nakazuje velik vpliv temperatur na omenjene fenološke faze. Rezultati kažejo, da so zveze bolj značilne za začetek kot za zaključek celične produkcije. Omenjeni rezultati dvofaktorskih linearnih regresijskih modelov za določanje datumov začetka in konca ter trajanja kambijeve produkcije lesa so prikazani na zemljevidih Evrope (slika 5 a, b, c).

Predstavljena študija je del dolgoročnega projekta spremljanja nastajanja lesa (in floema) v smreki in bukvi (*Fagus sylvatica*) na dveh rastiščih različnih nadmorskih višin v Sloveniji (Čufar et al., 2015). Rezultati kažejo, da je večletno spremljanje nastajanja lesa na isti drevesni vrsti in rastišču pomembno za razumevanje rasti dreves znotraj enega leta ter razlik med leti. Razlike so v veliki meri odvisne od letne in medletne variabilnosti klimatskih dejavnikov in izjemnih klimatskih razmer. Procesi nastajanja lesa in floema, na katere vplivajo tudi klimatske spremembe, so ključni za preživetje in produktivnost dreves ter nenazadnje za kakovost lesa.

ACKNOWLEDGEMENTS

ZAHVALA

The study was supported by the Slovenian Research Agency (programs P4-0015 and P4-0107 and project Z4-7318). International cooperation was supported by the LLP Erasmus bilateral agreement between the University of Ljubljana and the University of Alicante (supporting the project work of Fernando Useros and cooperation of Katarina Čufar, Martin De Luis and Josep Raventós) and by the COST Action FP1106, STReESS. We thank Luka Krže, for his valuable work in the field and laboratory, and Prof. Dr. Josep Raventos for his immense support for the cooperation among the co-authors. We are grateful to two anonymous referees for their valuable comments which helped us to improve the manuscript, and to Paul Steed for English language editing.

REFERENCES

VIRI

- ARSO (Slovenian Environment Agency), 2014. <http://www.arso.gov.si/en/> (Accessed 21 November 2014).
- Brus, R. (2012). Drevesne vrste na Slovenskem, 2nd ed. Ljubljana, Samozaložba.
- Caudullo, G., Tinner, W., & de Rigo, D. (2016). *Picea abies* in Europe: Distribution, habitat, usage and threats.
- Cegnar, T. (2015a). Podnebne značilnosti leta 2015. Naše okolje, 22 (12), 32–56.
- Cegnar, T. (2015b). Podnebne v letu 2015 v svetu. Naše okolje, 22 (12), 37–59.
- Cocozza, C., Palombo, C., Tognetti, R., La Porta, N., Anichini, M., Giovannelli, A., & Emiliani, G. (2016). Monitoring intra-annual dynamics of wood formation with microcores and dendrometers in *Picea abies* at two different altitudes. Tree physiology, 36(7), 832–846.
- Čufar, K., De Luis, M., Saz, M. A., Črepinšek, Z., & Kajfež-Bogataj, L. (2012). Temporal shifts in leaf phenology of beech (*Fagus sylvatica*) depend on elevation. Trees, 26(4), 1091–1100.
- Čufar, K., Prislan, P., de Luis, M., & Gričar, J. (2008). Tree-ring variation, wood formation and phenology of beech (*Fagus sylvatica*) from a representative site in Slovenia, SE Central Europe. Trees, 22(6), 749–758.
- Čufar, K., Prislan, P., Merela, M., Krže, L., & Gričar, J. (2015). Spremljanje nastajanja ksilema in floema ter kambijeve aktivnosti pri bukvi in smreki v Sloveniji. Monitoring v gozdarstvu, lesarstvu in papirništvu: zbornik prispevkov Znanstvenega srečanja Gozd in les, 53–57.
- Cuny, H. E., Rathgeber, C. B., Frank, D., Fonti, P., & Fournier, M. (2014). Kinetics of tracheid development explain conifer tree-ring structure. New Phytologist, 203(4), 1231–1241.
- Cuny, H. E., Rathgeber, C. B., Frank, D., Fonti, P., Mäkinen, H., Prislan, P., et al. (2015). Woody biomass production lags stem-girth increase by over one month in coniferous forests. Nature Plants, 1, 15160.
- Cuny, H. E., Rathgeber, C. B., Lebourgeois, F., Fortin, M., & Fournier, M. (2012). Life strategies in intra-annual dynamics of wood formation: Example of three conifer species in a temperate forest in north-east France. Tree Physiology, 32(5), 612–625.
- de Luis, M., Čufar, K., Saz, M. A., Longares, L. A., Ceglar, A., & Kajfež-Bogataj, L. (2014). Trends in seasonal precipitation and temperature in Slovenia during 1951–2007. Regional environmental change, 14(5), 1801–1810.
- de Luis, M., Gričar, J., Čufar, K., & Raventós, J. (2007). Seasonal dynamics of wood formation in *Pinus halepensis* from dry and semi-arid ecosystems in Spain. IAWA Journal, 28(4), 389–404.
- de Luis, M., Novak, K., Raventós, J., Gričar, J., Prislan, P., & Čufar, K. (2011). Climate factors promoting intra-annual density fluctuations in Aleppo pine (*Pinus halepensis*) from semiarid sites. Dendrochronologia, 29(3), 163–169.
- Martínez del Castillo, E. M., Longares, L. A., Gričar, J., Prislan, P., Gil-Pelegrín, E., Čufar, K., et al. (2016). Living on the edge: Contrasted wood-formation dynamics in *Fagus sylvatica* and *Pinus sylvestris* under Mediterranean conditions. Frontiers in Plant Science, 7
- EUFORGEN (2009). Distribution map of Norway spruce (*Picea abies*), www.euforgen.org
- Gričar, J., Prislan, P., De Luis, M., Gryc, V., Hacurová, J., Vavřík, H., & Čufar, K. (2015). Plasticity in variation of xylem and phloem cell characteristics of Norway spruce under different local conditions. Frontiers in plant science, 6, doi: 10.3389/fpls.2015.00730
- Gričar, J., Prislan, P., Gryc, V., Vavřík, H., de Luis, M., & Čufar, K. (2014). Plastic and locally adapted phenology in cambial seasonality and production of xylem and phloem cells in *Picea abies* from temperate environments. Tree Physiology, 34(8), 869–881.
- Gričar, J., Zupančič, M., Čufar, K., Koch, G., Schmitt, U., & Oven, P. (2006). Effect of local heating and cooling on cambial activity

- and cell differentiation in the stem of Norway spruce (*Picea abies*). *Annals of Botany*, 97(6), 943–951.
- Gruber, A., Strobl, S., Veit, B., & Oberhuber, W. (2010). Impact of drought on the temporal dynamics of wood formation in *Pinus sylvestris*. *Tree Physiology*, 30(4), 490–501.
- Humar, M., Fabčič, B., Zupančič, M., Pohleven, F., & Oven, P. (2008). Influence of xylem growth ring width and wood density on durability of oak heartwood. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 62(4), 368–371.
- Jyske, T., Mäkinen, H., Kalliokoski, T., & Nöjd, P. (2014). Intra-annual tracheid production of Norway spruce and Scots pine across a latitudinal gradient in Finland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 194, 241–254.
- Novak, K., De Luis, M., Saz, M. A., Longares, L. A., Serrano-Notivoli, R., Raventós, J., et al. (2016). Missing rings in *Pinus halepensis* – the missing link to relate the tree-ring record to extreme climatic events. *Frontiers in plant science*, 7.
- Novak, K., Sánchez, M. A. S., Čufar, K., Raventós, J., & de Luis, M. (2013). Age, climate and intra-annual density fluctuations in *Pinus halepensis* in Spain. *IAWA Journal*, 34(4), 459–474.
- Oberhuber, W., Swidrak, I., Pirkebner, D., & Gruber, A. (2011). Temporal dynamics of non-structural carbohydrates and xylem growth in *Pinus sylvestris* exposed to drought. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(8), 1590–1597.
- Plomion, C., Leprovost, G., & Stokes, A. (2001). Wood formation in trees. *Plant Physiology*, 127(4), 1513–1523.
- Prislan, P., Gričar, J., & Čufar, K. (2014). Wood sample preparation for microscopic analysis. University of Ljubljana, Department of Wood Science and Technology.
- Rathgeber, C. B., Longuetaud, F., Mothe, F., Cuny, H., & Le Moguédec, G. (2011). Phenology of wood formation: Data processing, analysis and visualisation using R (package CAVIAR). *Dendrochronologia*, 29(3), 139–149.
- Rossi, S., Deslauriers, A., & Morin, H. (2003). Application of the Gompertz equation for the study of xylem cell development. *Dendrochronologia*, 21(1), 33–39.
- Rossi, S., Deslauriers, A., Anfodillo, T., Morin, H., Saracino, A., Motta, R., et al. (2006). Conifers in cold environments synchronize maximum growth rate of tree-ring formation with day length. *New Phytologist*, 170(2), 301–310.
- Rossi, S., Deslauriers, A., Gričar, J., Seo, J., Rathgeber, C. B., Anfodillo, T., et al. (2008). Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates. *Global Ecology and Biogeography*, 17(6), 696–707.
- Rossi, S., Morin, H., Deslauriers, A., & Plourde, P. Y. (2011). Predicting xylem phenology in Black spruce under climate warming. *Global Change Biology*, 17(1), 614–625.
- Sinjur, I. (2017). Posledice pozebe v gozdu (Consequences of frost in the forest). *Gozdarski vestnik*, 5(75), 273–278.
- Swidrak, I., Gruber, A., & Oberhuber, W. (2014). Xylem and phloem phenology in co-occurring conifers exposed to drought. *Trees*, 28(4), 1161–1171.
- Trouet, V., & Van Oldenborgh, G. J. (2013). KNMI Climate Explorer: a web-based research tool for high-resolution paleoclimatology. *Tree-Ring Research*, 69(1), 3–13.
- Wilson, K., & White, D. J. B. (1986). The anatomy of wood: Its diversity and variability. Stobart & Son Ltd.
- Zavod za gozdove Slovenije (2017). Poročilo Zavoda za Gozdove Slovenije o gozdovih za leto 2016. Zavod za Gozdove Slovenije, Ljubljana http://www.zgs.si/fileadmin/zgs/main/img/pdf/letna_porocila/2016_Porocilo_o_gozdovih.pdf

UPOGIBNA TRDNOST IN TOGOST SLOJNATEGA FURNIRNEGA LESA (LVL) IZ TERMIČNO MODIFICIRANE IN NEMODIFICIRANE BUKOVINE

BENDING STRENGTH AND STIFFNESS OF LAMINATED VENEER LUMBER (LVL) MADE FROM THERMALLY MODIFIED AND UNMODIFIED BEECH VENEER

Jaša Saražin¹, Milan Šernek^{1*}, Miha Humar¹, Aleš Ugovšek²

UDK 630*832.286:812.71

Izvleček / Abstract

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Izvleček: Cilj raziskave je bil definirati in razviti lesni kompozit z majhnim presekom, ki bo lepljen pri sobni temperaturi in bo lahko uporabljen kot ojačitveni material v lesenih okenskih profilih velikih dimenzij. Na osnovi pregleda objav je bil kot najprimernejši kompozit izbran slojnat furnirni les (LVL). Izbran material za njegovo izdelavo je bil rezan 0,5 mm debel bukov (*Fagus sylvatica* L.) furnir, ki je bil zlepljen s poliuretanskim lepilom (Purbond HB 440) v 20 mm debel LVL. Ker je bil proučevan tudi učinek termične modifikacije, je bilo pol preizkušancev narejenih iz termično modificiranega furnirja, pol pa iz nemodificiranega. Upogibna trdnost in togost preizkušancev sta bili določeni s tritočkovnim upogibnim testom. Termično modificirani preizkušanci so dosegli 19 % nižjo upogibno trdnost kot nemodificirani, medtem ko se upogibni modul elastičnosti (togost) ni značilno spremenil. Povprečne upogibne trdnosti do 150 MPa so bile zadovoljive, upogibni moduli elastičnosti okoli 13 GPa pa so bili bistveno pod želenimi vrednostmi, kar je bilo pripisano izboru pretankega furnirja in lepljenju pri sobni temperaturi, ki ne omogoča zgoščevanja lepljenja.

Ključne besede: bukev, furnir, LVL, modul elastičnosti, termična modifikacija, upogibna trdnost

Abstract: The aim of the research was to define and develop a wooden composite with a thin cross-section and which could be used as reinforcement material in oversized wooden window profiles. An additional limitation was to bond the composite at room temperature. Based on a review of the literature, laminated veneer lumber (LVL) was chosen as the best option. The researched LVL samples were made of 0.5 mm thick, cut, beech (*Fagus sylvatica* L.) veneer, bonded with polyurethane adhesive (Purbond HB 440). Half of the samples were made of thermally modified veneers, and other half of unmodified. Bending strength and stiffness were determined with a three-point bending test. Thermally modified samples had on average 19 % lower bending strength compared to the unmodified samples, but the modulus of elasticity (stiffness) did not change significantly. The bending strength of up to 150 MPa was satisfactory, but the modulus of elasticity of 13 GPa was far below expectations. This is attributed to the selection of too thin veneer and too low bonding temperature, which does not enable densification of the composite.

Keywords: beech, veneer, LVL, modulus of elasticity, thermal modification, bending strength

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Lesena okna nadstandardnih dimenzij (minimalno 2,5 m) so velik tehnološki izziv v stavbnem pohištvu. Cilj je preseči razpon preko dveh nadstropij in doseči višino tudi več kot 5 m. Pri izdelavi lesenih okvirjev takšnih elementov je omejujoč dejavnik njihova nizka togost. Pri tako velikih površinah lahko pride namreč do prekomerne deformacije

(upogiba) lesenega profila v primeru močne vetrne obremenitve, ki je lahko tudi nepovratna.

Zato je bil namen raziskave definirati in modificirati ali razviti lesni kompozit z majhnim presekom, ki bi ga lahko uporabili kot ojačitveni material v okenskih okvirjih nadstandardnih dimenzij. Tak lesni kompozit naj bi imel čim večji upogibni modul elastičnosti. Poleg tega se pojavlja tehnološka zahteva, da naj bo izdelan s tehnologijo hladnega lepljenja (utrjevanje pri sobni temperaturi).

Lesni kompoziti, ki bi bili primerni za izdelavo tovrstnih ojačitev, so načeloma tisti, ki se v gradbeništvu uporabljajo kot nosilni konstrukcijski elementi. Njihove mehanske lastnosti se izboljšajo z narašča-

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenija

* e-pošta: milan.sernek@bf.uni-lj.si

² M Sora d.d., Trg svobode 2, 4226 Žiri, Slovenija

njem dolžine osnovnih lesnih gradnikov in njihovo usmerjenostjo/poravnanostjo. Odvisne so tudi od uporabljenega lepila, lesne vrste in gostote. Konstrukcijska kompozita z najdaljšimi osnovnimi gradniki in vzporedno usmerjenimi/poravnanimi lesnimi vlakni sta lepljen lameliran les (glued laminated timber - GLULAM), ki je sestavljen iz vzporedno orientiranih lesnih lamel in slojnat furnirni les (laminated veneer lumber – LVL), ki je sestavljen iz vzporedno orientiranega luščenega furnirja. GLULAM ima bistveno daljšo tradicijo izdelave kot LVL. Med izdelavo GLULAM-a se lesna vlakna znotraj posameznih lamel ne poškodujejo, kar se zgodi v procesu luščenja furnirja za izdelavo LVL. Čeprav evropski standard za GLULAM (SIST EN 14080:2013) predvideva izdelavo GLULAM-a le iz lesa iglavcev in topola (do trdnostnega razreda GL 32 h (c), je nemški lesarski inštitut (Deutsches Institut für Bautechnik) odobril proizvodnjo konstrukcijskega GLULAM-a iz lesa bukve vse do trdnostnega razreda GL 48 c (Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, 2013). Zaradi večjega osnovnega gradnika (lamelle) je GLULAM manj primeren za ojačitve z majhnim presekom kot LVL.

Na osnovi pregleda relevantne literature smo za ojačitveni material za okna velikih dimenzij kot najbolj primeren lesni kompozit izbrali LVL. V skladu s standardom je konstrukcijski LVL lahko nosilni ali nenosilni element, sestavljen iz najmanj petih lesnih furnirjev, ki so tanjši od 6 mm. Furnirji (smer lesnih vlaken) morajo biti orientirani vzporedno, izjemoma so dovoljeni posamezni prečno postavljeni furnirji,

ki povečajo bočno stabilnost izdelku. LVL je lahko sestavljen tudi iz furnirjev različnih lesnih vrst, najvišji trdnostni razred, ki ga predvideva standard je LVL 80 s (draft prEN 14374, 2016).

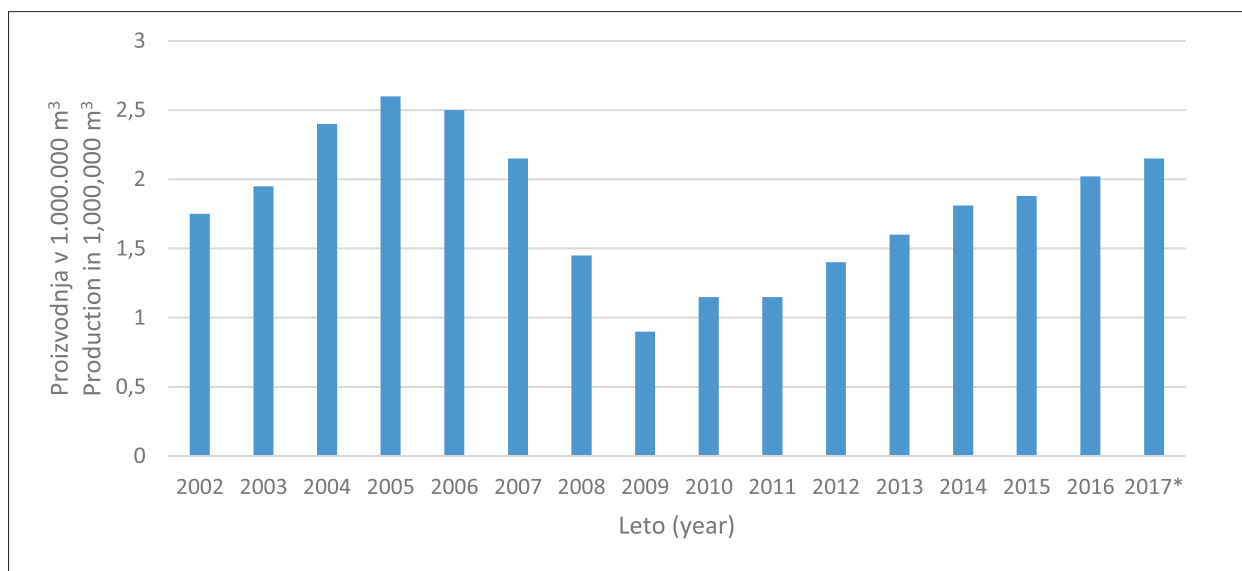
Prednosti LVL pred masivnim lesom in ostalimi lesnimi konstrukcijskimi proizvodi so številne. LVL tehnologija izrablja tudi furnir, ki je bil pridobljen iz hlodovine manjših premerov, ki ni primerna za žagan les. Ker so iz furnirjev izločene vse bistvene napake, ostale pa so naključno porazdeljene v številne plasti furnirjev, je zagotovljena visoka homogenost znotraj izdelka, ki je lahko dolg do 25 m (Metsä Wood, 2017a) in več, če je uporabljen kontinuiran način proizvodnje. Zaradi visoke nosilnosti glede na lastno maso so LVL nosilci lahko konkurenčni klasičnim gradbenim materialom, kot so jeklo, beton in umetni materiali (Resnik, 1987; Šernek & Jošt, 2004).

Severna Amerika ima z začetkom proizvodnje LVL v 60-ih letih najdaljšo tradicijo izdelave tega kompozita, ki se še danes odraža v svetovno največji proizvodnji. Letno povprečje proizvodnje v Severni Ameriki za zadnjih petnajst let (2002–2017) znaša blizu 2 milijona m³ LVL (Forest Products Annual Market Review, 2004–2017), kar je predstavljeno na sliki 1.

V Evropi je proizvodnja LVL manj razširjena kot v Severni Ameriki. Kumulativnih vrednosti za evropsko proizvodnjo LVL ni moč dobiti, je pa dejstvo, da se število velikih proizvajalcev in proizvodnja LVL povečujeta. S komercialnim začetkom proizvodnje LVL leta 1981 ima najbogatejšo zgodovino na evropskih

Preglednica 1. Osnovne mehanske lastnosti LVL in GLULAM, povzete po dokumentih draft prEN 14374:2016, SIST EN 14080:2013 in Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (2013) ter večjih evropskih proizvajalcih LVL
Table 1. Basic mechanical properties of LVL and GLULAM summarised from draft prEN 14374:2016, SIST EN 14080:2013, and Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (2013) and the bigger European LVL producers

	Upogibna trdnost po ploskvi karakteristična / Characteristic bending strength flatwise (MPa)	Upogibna trdnost po robu karakteristična / Characteristic bending strength edgewise (MPa)	Modul elastičnosti povprečen / Average modulus of elasticity (GPa)	Gostota povprečna / Average density (kg/m ³)
LVL 80 S (BauBuche S)	80	70	16,8	800
LVL Ultralam Rbirch	75	65	17,5	600
LVL 52 S (Ultralam RS)	52	55	15,6	580
LVL 50 S (Kerto S)	50	44	13,8	510
GL 48 c	48	-	15,1	650
GL 32 h	32	-	14,2	490
GL 32 c	32	-	13,5	440



Slika 1. Proizvodnja LVL v Severni Ameriki.

*vrednost za 2017 je predvidena (povzeto po: Forest Products Annual Market Review, 2004–2017)

Figure 1. LVL production in North America.

*The value for 2017 is predicted (summarized from: Forest Products Annual Market Review, 2004–2017)

tleh finski Metsä Wood, s trenutno letno kapaciteto proizvodnje 230.000 m³ LVL iz furnirja iglavcev (Kerto) (Metsä Wood, 2017b). Leta 2008 je s proizvodnjo LVL začel ruski Modern Lumber Technologies (MLT), z letno kapaciteto proizvodnje med 150.000 m³ in 250.000 m³ LVL (Ultralam) (MLT, 2017), nemški Pollmeier, ki na leto proizvede do 180.000 m³ bukovnega LVL (BauBuche), pa je s proizvodnjo tega modernega kompozita začel leta 2014 (Pollmeier, 2017). V preglednici 1 so poleg standardiziranih trdnostnih razredov navedena tudi komercialna imena LVL izdelkov. Izjema je le Ultralam Rbitch iz brezovega furnirja, kjer so zgolj navedene deklarirane vrednosti izdelka.

Togost LVL-a je mogoče povečati na več načinov. Abdelhakim et al. (2011) so s pregledom dotedanjih objav povzeli, da se s tanjšanjem furnirnih listov in povečevanjem njihovega števila v lepljencu večina mehanskih lastnosti LVL-a izboljša. Tanjši furnir je namreč po procesu luščenja manj poškodovan ter je bolje prepojen z lepilom kot debelejši furnir. S svojo raziskavo so na LVL iz bukovnega furnirja z uporabo melamin-urea-formaldehidnega lepila dosegli togosti okoli 14 GPa. Togost LVL-a bi lahko povečali tudi z zgoščevanjem med procesom stiskanja, vendar smo bili v naši raziskavi omejeni na hladno stiskanje, ki ne omogoča zadostne plastifikacije in

zgoščevanja lesa. Potencialna možnost za povečanje togosti je tudi termična modifikacija lesa. V nekaterih raziskavah vpliva termične modifikacije lesa na njegove lastnosti je bilo ugotovljeno, da le-ta pozitivno vpliva na odpornost lesa in njegovo dimenzijsko stabilnost, negativno pa vpliva na večino mehanskih lastnosti. Izjema je le modul elastičnosti, ki je pri manjših stopnjah modifikacije lahko celo višji kot pri nemodificiranem lesu (Kariž, 2011 in Widmann et al., 2012).

Zaradi navedenih dognanj smo se odločili, da cilje raziskave usmerimo v primerjavo lastnosti med LVL iz termično modificiranega tankega furnirja in LVL iz nemodificiranega tankega furnirja.

2 MATERIAL IN METODE

2 MATERIALS AND METHODS

Za osnovni material pri izdelavi LVL smo uporabili visokokakovostni 0,5 mm debel rezan furnir navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.) (NB), ki je kakovostnejši od luščenega, (običajno uporabljen v industrijski proizvodnji LVL) ter termično modificiran bukov (TMB) furnir za primerjavo. Termična modifikacija furnirja je bila opravljena pri 190 °C po postopku Silvapro® (Rep et al., 2012). Modifikacija je bila izvedena v industrijski komori za termično mo-

difikacijo v podjetju Silvaproduct. Furnirje smo lepili s poliuretanskim lepilom Purbond HB 440 v hidravlični stiskalnici pri sobni temperaturi. Nanos lepila je bil enostranski 200 g/m², ostali parametri lepljenja so prikazani v preglednici 2. Zaradi možnih težav pri lepljenju termično modificiranega furnirja smo čas stiskanja iz priporočenih 2 ur povečali na 3 ure, kar se je v preliminarnem poizkusu izkazalo za zadostno. Izdelali smo 4 plošče debeline 20 mm, formata 100 – 200 mm × 450 mm, ki smo jih razžagali na končne preizkušance dolžine 400 mm in preseka 20 mm × 20 mm za tritočkovni upogib v skladu s standardom ISO 13061-3-4 (2014).

Pred testiranjem smo preizkušance klimatizirali v standardni klimi z relativno zračno vlago (65 ± 5) % in temperaturo (20 ± 2) °C do konstantne mase. Določanje upogibnega modula elastičnosti in upogibne trdnosti smo izvedli s testirnim strojem Zwick Z100, s konstantno hitrostjo obremenjevanja 7 mm/min, tako da je lom preizkušanca nastopil v času (90 ± 30) s. Razdalja med podpornima valjema je znašala 280 mm (14-kratnik višine preizkušancev). Premeri pritisknega in podpornih valjev so bili 30 mm. Povese je bil merjen z ekstenziometrom. Upogibni test smo opravili tako po ploskvi (pol preizkušancev),

kot tudi po robu (pol preizkušancev). Shematski prikaz tritočkovnega upogiba in uporabljene veličine so prikazane na sliki 2.

Upogibno trdnost (σ) smo izračunali po naslednji formuli (ISO 13061-3, 2014):

$$\sigma = \frac{3P_{\max}l}{2bh^2}$$

$P_{\max}$ sila loma (N)

l razdalja med podporama (mm)

b širina preizkušanca (mm)

h debelina preizkušanca (mm)

Upogibni modul elastičnosti (E) smo izračunali po naslednji formuli (ISO 13061-4, 2014):

$$E = \frac{l^3(P_{40} - P_{10})}{4bh^3(f_{40} - f_{10})}$$

P_{40} ali P_{10} 40 % ali 10 % maksimalne sile (N)

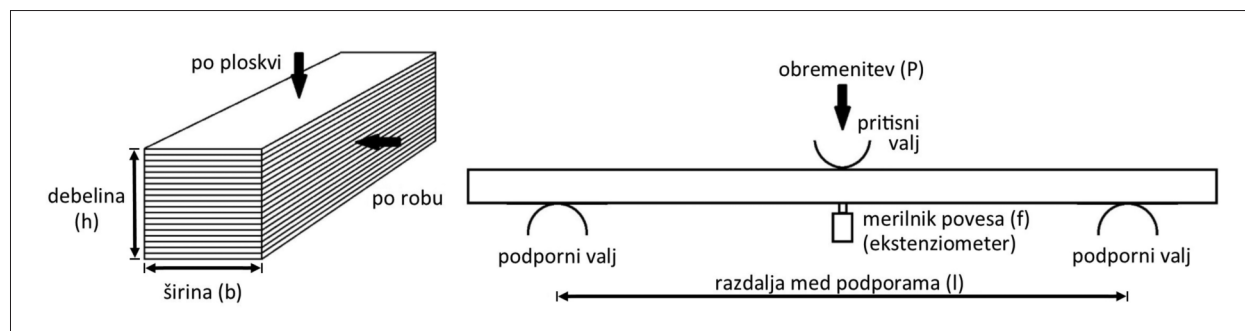
f_{40} ali f_{10} povese pri 40 % ali 10 % maksimalne sile (mm)

Statistično značilnost razlik med aritmetičnimi sredinami smo ugotavljali z analizo variance (ANOVA) ter jo podali s P-vrednostjo. V kolikor je le-ta manjša

Preglednica 2. Parametri lepljenja LVL

Table 2. Bonding parameters of LVL

Oznaka plošče / Board label	Debelina listov / Veneer thickness (mm)	Št. listov / Veneer layers	Debelina plošče / Board thickness (mm)	Čas stiskanja / Pressing time (h)	Tlak stiskanja / Pressure (MPa)	Odpri čas / Open time (min)	Št. preizkušancev / Number of samples
Plošča 1 TMB	0,51	41	20,10	3,0	1,3	21	6
Plošča 2 TMB	0,51	41	20,42	3,2	1,1	19	6
Plošča 3 NB	0,53	39	20,24	2,5	1,2	20	4
Plošča 4 NB	0,54	39	20,54	2,9	1,1	20	8



Slika 2. Shematski prikaz upogibnega testa LVL

Figure 2. Schematic representation of LVL bending test

od 0,05, lahko z več kot 95 % gotovostjo trdimo, da razlike med aritmetičnimi sredinami obstajajo. Ugotavljanje vlažnosti in gostote preizkušancev smo opravili po standardu ISO 13061-1-2 (2014). Za primerjavo naših upogibnih trdnosti s karakterističnimi upogibnimi trdnostmi komercialnih LVL smo uporabili 5-percentilno vrednost, izračunano po naslednji formuli:

$$\sigma_{0,05} = \bar{\sigma} - t * SO$$

t $t_{0,95}$ - vrednost pri t - porazdelitvi za 6 preizkušancev ($df = 5$) znaša 2,015

SO standardni odklon

3 REZULTATI Z RAZPRAVO

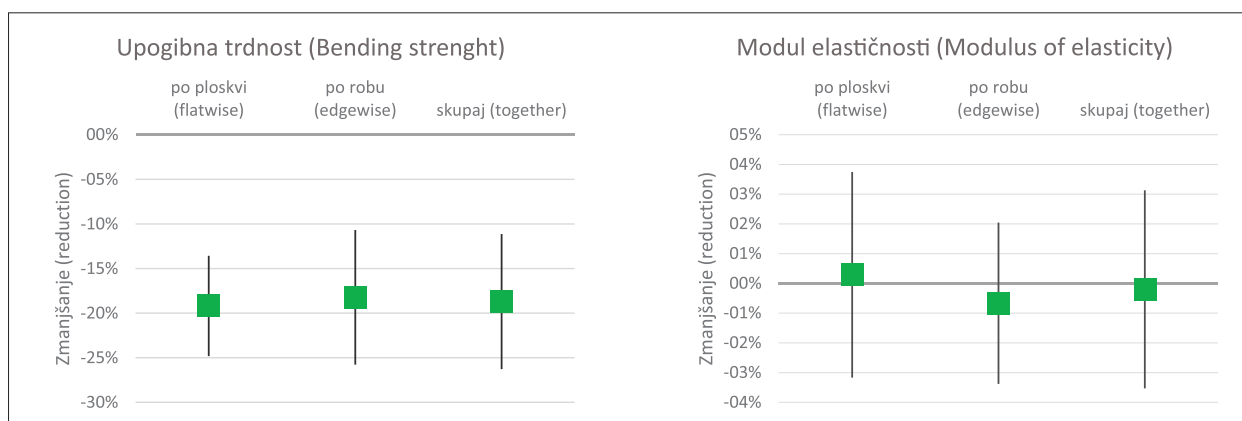
3 RESULTS AND DISCUSSION

V preglednici 3 so predstavljeni rezultati meritev modula elastičnosti in upogibne trdnosti. Podane so povprečne vrednosti (X), njihovi standardni odkloni (SO) in koeficienti variacije (KV). Povprečna gostota in vlažnost klimatiziranih preizkušancev, narejenih iz furnirja termično modificirane bukovine (TMB) je znašala 972 kg/m³ ter 4,2 %, preizkušancev iz nemodificiranega bukovega (NB) furnirja pa 981 kg/m³ ter 5,2 %. S primerjavo gostote samega furnirja in končnega LVL kompozita smo delež lepila v kompozitu ocenili na 35 %, kar je bilo pri tako tankem furnirju pričakovano.

Preglednica 3. Rezultati upogibnega testa (X – povprečna vrednost, SO – standardni odklon, KV – koeficient variacije)

Table 3. Results of bending test (X – mean value, SO – standard deviation, KV – coefficient of variance)

	Upogibni modul elastičnosti (E) / Modulus of elasticity in bending			Upogibna trdnost (σ) / Bending strength		
	X (MPa)	SO (MPa)	KV (%)	X (MPa)	SO (MPa)	KV (%)
NB ploskev (flatwise)	12705	490	3,9%	142	11,0	7,7%
TMB ploskev (flatwise)	12742	441	3,5%	114	6,4	5,6%
NB rob (edgewise)	13144	739	5,6%	150	9,0	5,8%
TMB rob (edgewise)	13056	354	2,7%	123	9,2	7,5%
NB skupaj (together)	12924	664	5,1%	146	10,8	7,4%
TMB skupaj (together)	12899	430	3,3%	118	9,0	7,6%
Ploskev skupaj (flatwise together)	12723	467	3,7%	128	16,3	12,7%
Rob skupaj (edgewise together)	13100	581	4,4%	136	16,4	12,0%



Slika 3. Zmanjšanje upogibne trdnosti (levo) in modula elastičnosti (desno) LVL iz TMB glede na NB. Zeleni kvadrati prikazujejo povprečno zmanjšanje, interval pa $\pm$ koeficient variacije.

Figure 3. Reduction of bending strength (left) and the modulus of elasticity (right) of thermally modified samples in comparison to unmodified ones. Green squares show the average reduction and the interval shows the $\pm$ coefficient of variance

Z visoko statistično zanesljivostjo smo ugotovili, da termična modifikacija vpliva na zmanjšanje upogibne trdnosti (P-vrednost manjša od 0,001). Pri NB je bila povprečna upogibna trdnost 146 MPa, pri TMB pa je bila za 18,7 % nižja. Togost kompozita (modul elastičnosti) se kljub termični modifikaciji ni značilno spremenila (P-vrednost = 0,92). Tako smo poleg pridobljenih odpornostnih lastnosti, ki jih pri naša termična modifikacija, obdržali tudi prvotno togost kompozita. Slika 3 prikazuje znižanje obeh mehanskih lastnosti TMB glede na NB. Do podobnih zaključkov je prišel tudi Widmann et al. (2012) na masivni bukovini.

Razlike v upogibnih lastnostih glede na smer obremenitve LVL kompozita so bile bolj izrazite, vendar še vedno ne statistično značilne. Pri obremenitvah po robu smo v povprečju izmerili za 3,0 % višji modul elastičnosti (P-vrednost = 0,11) in za 6,5 %

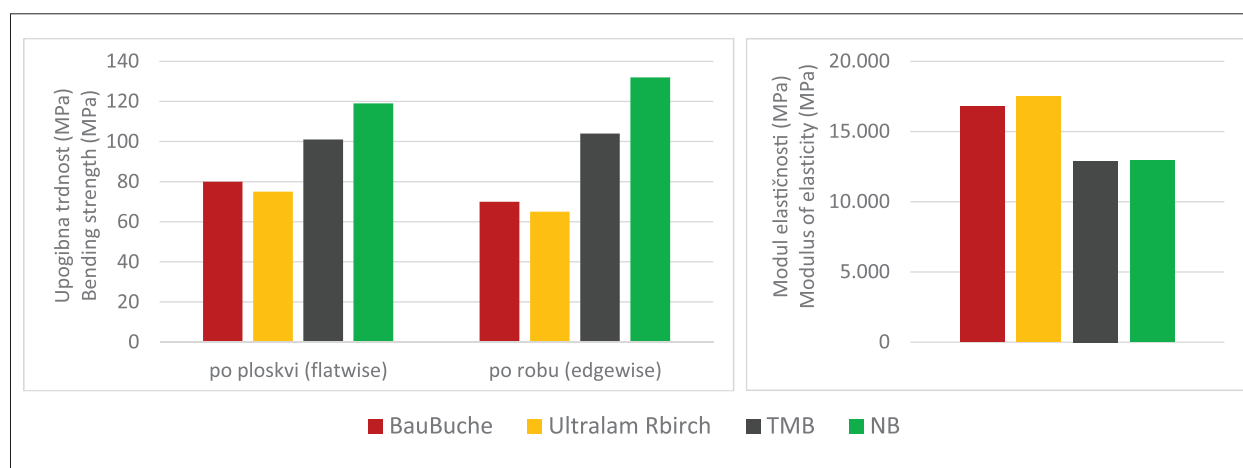
višjo upogibno trdnost (P-vrednost = 0,25) kot pri obremenitvah po ploskvi.

V preglednici 4 so prikazane 5-percentilne vrednosti upogibne trdnosti, ki smo jih v našem primeru povzeli kot karakteristične upogibne trdnosti. Na sliki 4 so mehanske lastnosti LVL iz naše raziskave primerjane z dvema komercialnima LVL proizvajalca. Karakteristične upogibne trdnosti, ki smo jih povzeli kot 5-percentilne vrednosti, izračunanih iz naših meritev, so bistveno višje od karakterističnih vrednosti komercialnih LVL, kar je na eni strani posledica visoke povprečne trdnosti, na drugi strani pa majhne variabilnosti med našimi maloštevilnimi preizkušanci. Vrednosti, ki podajajo modul elastičnosti, pa so bistveno nižje od tistih za komercialni LVL, čeprav je bil komercialni LVL narejen iz manj kakovostnega in debelejšega furnirja. Eden od razlogov za nizek padec mehanskih lastnosti LVL, izdelanih iz ter-

Preglednica 4. Dobljene 5-percentilne vrednosti upogibne trdnosti smo v našem primeru povzeli kot karakteristične trdnosti.

Table 4. Five-percentile bending strength values were used as characteristic bending strengths in this study

	Upogibna trdnost po ploskvi – 5-percentilna vrednost / Bending strength flatwise – 5-percentile value (Mpa)	Upogibna trdnost po robu – 5-percentilna vrednost / Bending strength edgewise – 5-percentile value (Mpa)
TMB LVL	101	104
NB LVL	119	132



Slika 4. Primerjava karakterističnih upogibnih trdnosti (levo) in povprečnega modula elastičnosti (desno) proučevanega LVL (TMB in NB) s komercialnim LVL (BauBuche S in Ultralam Rbitch).

**naši karakteristični trdnosti sta podani kot 5-percentilni vrednosti.*

Figure 4. The comparison of characteristic bending strengths (left) and average modulus of elasticity (right) of our LVL (TMB and NB) with commercial BauBuche S and Ultralam Rbitch.

**Our characteristic values were calculated as 5-percentile values*

mično modificiranih furnirjev, lahko pripišemo tudi dejstvu, da s termično modifikacijo vplivamo tudi na sorpcijske lastnosti. Ravnovesna vlažnost termično modificiranega lesa je za nekaj odstotnih točk nižja od ravnovesne vlažnosti nemodificiranega lesa (Kariž, 2011). Kot je znano iz strokovne literature, se upogibna trdnost s padanjem vlažnosti lesa izboljšuje, kar je eden od razlogov za majhen padec mehanskih lastnosti termično modificiranega bukovnega lesa.

4 SKLEPI

4 CONCLUSIONS

Ugotovili smo, da termična modifikacija furnirja negativno vpliva na upogibno trdnost proučevanega LVL. Dobljene trdnosti so zadovoljive glede na komercialni LVL, kar pripisujemo pravilnemu izboru materialov.

Ugotovili smo, da termična modifikacija furnirja ni vplivala na spremembo upogibnega modula elastičnosti. Kljub vsemu je ugotovljena togost bistveno nižja od želene. Menimo, da bi višjo togost LVL lahko dosegli z vročim lepljenjem, ki omogoča zgoščevanje LVL, z uporabo drugega lepila, ki se običajno uporablja v komercialni proizvodnji LVL in z uporabo nekoliko debelejšega furnirja. Te predpostavke nameravamo proučiti v nadaljevanju raziskav.

5 POVZETEK

5 SUMMARY

The aim of the research was to find and develop a wood-based composite with a thin cross-section which could be used as reinforcement material in oversized window profiles. The crucial property of a reinforcement material is high stiffness, which in our case was determined as the modulus of elasticity (MOE).

A literature review revealed laminated veneer lumber (LVL) as the best option. The best commercial examples were BauBuche S and Ultralam Rbitch. BauBuche S, which is LVL made of beech veneers by the biggest German producer, has a flatwise characteristic bending strength of 80 MPa and average MOE of 16800 MPa (Pollmeier, 2017). Russian LVL Ultralam Rbitch, made from birch veneers, has a slightly higher average MOE of 17500 MPa (MLT,

2017). More parameters of several commercial LVL and GLULAM can be found in Table 1.

While trying to achieve higher MOE, we focused on the following findings from the literature. Firstly, Abdelhakim et al. (2011) pointed out that with decreasing veneer thickness and an increasing number of layers, most of LVL mechanical properties (including MOE and bending strength) increase. Secondly, Kariž (2011) and Widmann et al. (2012) noted that thermal modification of wood, which improves its durability, can also result in greater MOE while using less intense thermal modification.

LVL bending specimens were made of high quality 0.5 mm thick, cut, beech (*Fagus sylvatica* L.) veneers, bonded with polyurethane adhesive (Purbond HB 440) at room temperature. Half of the samples were made from thermally modified veneers (TMB) and other half from unmodified ones (NB).

Bending strength and stiffness were determined with the three-point bending test, following the standard ISO 13061-3 and 4 (2014). Thermally modified samples had on average 18.7 % lower bending strength compared to unmodified ones (the mean values were significantly different $P < 0,001$), but the MOE did not change significantly ($P = 0,92$) (Figure 3). Differences between flatwise and edge-wise loading were higher, but also not significantly different ($P = 0,11$ for MOE and $P = 0.25$ for bending strength). For both properties, edgewise loading resulted in higher values. Detailed results are shown in Table 3 and the comparison with commercial LVL in Figure 4.

The evaluation of the results considered the bending strengths as satisfactory. The characteristic values for NB and TMB were higher than those for commercial LVL. These results are attributed to the high quality and homogeneous beech veneers, bonded together with adhesive with high bonding strength.

On the other hand, the MOE values were far below expectations. The mean MOE of 13 GPa was lower than that of any commercial LVL. This is attributed to too thin veneer selection and too low bonding temperature. We assume that with use of a slightly thicker veneer and formaldehyde-based adhesive at high temperature, then a satisfactory MOE could be achieved.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENTS

Izvedbo raziskave je omogočil projekt: TIGR4-smart – Trajnostno in inovativno gradbeništvo za pametne stavbe. Za pomoč bi se radi še posebej zahvalili projektnemu partnerju M Sora d.d., za termično modifikacijo bukovine pa podjetju Silvaproduct d.o.o.

Šernek, M., & Jošt, M. (2004). Konstrukcijski kompozitni les. Les, 56(7/8), 230-235.

Widmann, R., Fernandez-Cabo, J., & Steiger, R. (2012). Mechanical properties of thermally modified beech timber of structural purposes. European Journal of Wood and Wood Products, 70(6), 775-784.

VIRI

REFERENCES

Abdelhakim, D. (2011). Influence of veneer quality on beech LVL mechanical properties. Maderas. Ciencia y tecnologia 13(1), 69-83. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/262483843_Influence_of_veneer_quality_on_beech_LVL_mechanical_properties.

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (2013). Deutsches Institut für Bautechnik. Retrieved from <http://www.brettschichtholz.de/publish/binarydata/pdfs/abz-bsh-bu-2013-04-16.pdf>.

EN 14374 (2016). Timber structures – Laminated veneer lumber (LVL) – Requirements. (Draft prEN 14374:2016).

EN 14080 (2013). Timber structures – Glued laminated timber and glued solid timber – Requirements (SIST EN 14080:2013).

Forest Products Annual Market Review (2004-2017). UNECE. Retrieved from <https://www.unece.org/forests/fpamr.html>.

ISO 13061 (2014). Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens. Part 1 – part 4. (ISO 13061-1:2014, ISO 13061-2:2014, ISO 13061-3:2014, ISO 13061-4:2014).

Kariž, M. (2011). Vpliv termične modifikacije lesa na utrjevanje lepil in kakovost lepilnih spojev. Doktorska disertacija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.

Metsä Wood (2017a). Retrieved from <http://www.metsawood.com/global/tools/materialarchive/materialarchive/metsawood-kerto-s-english.pdf> (7.8.2017).

Metsä Wood (2017b). Retrieved from <http://www.metsawood.com/global/Tools/MaterialArchive/MaterialArchive/Kerto-Manual-Production.pdf> (7.8.2017).

MLT (2017). MLT - Modern Lumber Technologies Ltd. Ultralam LVL. Retrieved from <http://ultralam.com/products/laminated-veneer-lumber-lvl/> (21.8.2017).

Pollmeier (2017). Retrieved from <https://www.pollmeier.com/en/> (26.7.2017).

Rep, G., Pohleven, F., & Košmerl, S. (2012). Development of the industrial kiln for thermal wood modification by a procedure with an initial vacuum and commercialisation of modified Silvapro wood. V: JONES, Dennis (ur.), et al. Proceedings, The Sixth European Conference on Wood Modification, Ljubljana, Slovenia, 17-18 September. Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology. 2012, str. 11-17.

Resnik, J. (1987). LVL – nova generacija lepljenega lesa za gradbeništvo. Les/wood, 39, 25-32.

UPORABA NARAVNIH OLJ ZA POVRŠINSKO ZAŠČITO LESA NAVADNE BUKVE

USAGE OF NATURAL OILS FOR SURFACE PROTECTION OF COMMON BEECH WOOD

Jure Žigon^{1*}, Ajda Pogorelnik¹, Marko Petrič¹, Matjaž Pavlič¹

UDK 630*829.1:176.1 *Fagus sylvatica*

Izvilleček / Abstract

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Izvilleček: Za površinsko zaščito lesa navadne bukove (*Fagus sylvatica* L.) smo uporabili različna naravna olja. Lastnosti premazanih površin smo proučili po različnih standardnih postopkih. Proučevali smo čas utrjevanja, spremembe barve in sijaja, navzem olj v les in navzem vode v oljen les, z meritvami navideznih kontaktnih kotov kapljic vode pa smo ocenili vodoodbojnost oljenega lesa. Rezultati standardnih preskusov odpornosti so pokazali, da imajo med olji, uporabljenimi v tej raziskavi, tungovo, komercialno olje decking in laneno olje najboljše vodoodbojne in zaščitne lastnosti. Slabše odpornostne lastnosti so bile ugotovljene pri površinah, premazanih z orehovim, konopljinim in kokosovim oljem.

Ključne besede: *Fagus sylvatica*, naravna sušča olja, lastnosti, tenziometer, omočljivost

Abstract: Different natural drying oils were used for surface finishing of common beech wood (*Fagus sylvatica* L.). Surface performances and properties of the oiled surfaces were investigated according to the standard tests. Drying time, colour and gloss changes, uptake of oils into wood and uptake of liquid water into oiled wood, were determined, and the wettability of oiled wood surfaces was investigated by determination of the apparent contact angles of water. The results of the standard resistance tests showed that tung oil, the commercial decking and linseed oil had the best water repellent and protective properties. Worse properties were determined for those surfaces finished with walnut, hemp and coconut oils.

Keywords: *Fagus sylvatica*, natural drying oils, properties, tensiometer, wettability

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Najpomembnejši vodoodbojni pripravki za zaščito lesa so formulacije oz. emulzije voskov, spojine silicija, topne v vodi in v organskih topilih, smolne kisline in sušča olja (Humar & Lesar, 2013; Žlahtič et al., 2017). Tako se je npr. kombinacija vodotopnih smolnih kislin z organskimi biocidi izkazala kot odličen vodoodbojni sistem (Singh & Singh, 2012).

Večja okoljska ozaveščenost v zadnjih letih in posledično spodbujanje uporabe obnovljivih virov in okolju prijaznih kemikalij sta privedla do povečanega zanimanja za "nebiocidne", okolju prijaznejše metode zaščite lesa (Hyvönen et al., 2005). Izraz "nebiocidni" vključuje naravna olja, voske, silikone, smole, polimere, kemično modifikacijo in toplotne obdelave (Van Eecke et al., 2001).

Kot kažejo rezultati različnih raziskav, naravna olja z obetavno kemično in fizikalno sestavo ovirajo vdor vode v les (Sailer et al., 2000). Nenasičena olja (sušča olja) ob izpostavitvi atmosferskemu kisiku oksidirajo (Hyvönen et al., 2005) in oviro za vdor vode v les zagotavlja prav njihova zmožnost utrjevanja (Van Eecke et al., 2001). Eden od prevladujočih parametrov, ki vplivajo na lastnosti olja, je stopnja nenasičenja ali jedno število, izračunano iz količine joda, ki pri posebnih pogojih reagira z dvojnimi vezmi (Budja, 2008). Rastlinska olja imajo tendenco absorbiranja in prepuščanja vlage, kar je vzrok za nizko stopnjo njihove alkalne odpornosti (Ahmed et al., 2013).

Naravna olja so bila uporabljena kot sredstva za povečanje vodoodbojnosti lesa in kot premazi v različnih študijah. V nedavni raziskavi je bilo dokazano, da impregnacija termično modificirane topolovine in brezovega lesa s tungovim oljem izboljša njuno vodoodbojnost in dimenzijsko stabilnost (Ahmed et al., 2017). Iz taninskih smol, lanenega in tungovega

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenija

* e-pošta: jure.zigon@bf.uni-lj.si; telefon: 01-320-3612

olja so bili prav tako izdelani smolni premazi. Premazi z dobrim sijajem in odpornostjo proti kemikalijam so bili pripravljene iz kondenziranih taninov in furfurala, pridobljenega iz semen indijskih oreščkov in lupine kokosa (Kumar & Sethuraman, 2004). Impregnacija lesa rdečega bora (*Pinus sylvestris* L.) z lanenim, kokosovim in različnimi talovimi olji povečuje njegovo vodoodbojnost (Ahmed et al., 2013).

Tungovo olje je sušče olje, pridobljeno s stiskanjem semen oreščkov tungovca (*Aleurites fordii* Hemsl. in *Aleurites montana* (Lour.) Wils.). Semena v povprečju vsebujejo od 53 % do 60 % olja (Budja, 2008; Ahmed et al., 2013). Tungovo olje ob izpostavitvi zraku utrjuje in tvori transparenten film. Tungovo olje sestoji iz naslednjih maščobnih kislin: palmitinska kislina (5,5 %), oleinska kislina (4,0 %), linolna kislina (8,5 %), in α -eleostearinska kislina (82,0 %) (Budja, 2008). Zaradi prisotnosti α -eleostearinske maščobne kisline ima tungovo olje veliko tendenco za polimerizacijo pri izpostavitvi kisiku.

Konoplino olje pridobivamo iz vrste *Cannabis sativa* L., ki ne vsebuje večje količine tetrahidrokanabinola (THC), psihoaktivnega elementa, ki je prisoten v rastlini konoplje. Konoplino olje v 84 % sestavljajo polinenasičene maščobne kisline in je izjemno bogat vir linolne kisline (56 %) in α -linolenske kisline (22 %) (Callaway, 2004).

Laneno olje je prozorno do rumenkasto olje, pridobljeno iz posušenih zrelih semen lanu (*Linum usitatissimum*). V 76 % ga predstavljajo polinenasičene maščobne kisline in je tudi odličen vir α -linolenske kisline v olju (55 %), zaradi česar je s hitrimi polimerizacijskimi lastnostmi idealen za barve, lake in črnila (Callaway, 2004; Shim et al., 2014).

Kokosovo olje je nasičeno olje, pri sobni temperaturi v trdnem stanju. Najpomembnejša fizikalna lastnost kokosovega olja je, da v nasprotju z večino maščob nima postopnega mehčanja s poviševanjem temperature, ampak precej nenadoma, v ozkem temperaturnem območju, prehaja iz krhke trdne snovi v tekočino. Kokosovo olje vsebuje več kot 45 % lavrinske kisline, med 16,8 in 21 % miristinske kisline in druge (Bawalan & Chapman, 2006).

V tej raziskavi smo izbrali pet različnih vrst naravnih olj in eno vrsto oljnega pripravka, ki je vsebovalo naravna olja in sintetične polimere: laneno, orehovo, konoplino, kokosovo, tungovo in olje decking. Z opravljenimi meritvami in izvedenimi preskusi smo poskušali dobiti vpogled v interakcije teh

olja s površinami bukovega lesa in pregled lastnosti obdelanih površin, še posebej z vidika možne uporabnosti oljene bukovine za izdelavo lesenega nakita (Pogorelčnik, 2017).

2 MATERIALI IN METODE

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 PRIPRAVA VZORCEV

2.1 SPECIMEN PREPARATION

Za raziskave smo uporabili les navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.). Dimenzije 18 večjih vzorcev za določitev odpornostnih lastnosti, barve, sijaja in kontaktnega kota vode so bile 500 mm $\times$ 135 mm $\times$ 20 mm. Za določanje kratkotrajnega navzema olj in vode s tenziometrom smo pripravili 70 manjših vzorcev z dimenzijami 50 mm $\times$ 20 mm $\times$ 20 mm (vzdolžno $\times$ radialno $\times$ tangencialno). S posameznim oljem je bilo tako premazanih 10 malih in 3 veliki vzorci. Pred nanosom zaščitnih sredstev smo površine pobrusili z brusnim papirjem granulacije P150. Olja smo pred uporabo dobro premešali. Za premazovanje smo izbrali naslednja olja: laneno olje (komercialno olje, namenjeno za impregnacijo lesa in kamna; orehovo olje (komercialno 100 % jedilno nerafinirano orehovo olje; konoplino olje (komercialno 100 % jedilno hladno stiskano konoplino olje); kokosovo olje (rafinirano jedilno bio kokosovo olje); tungovo olje (naravno olje, namenjeno za zaščito lesa) in olje »decking«. Olje decking je komercialno dostopen izdelek, pripravljen iz zmesi naravnih rastlinskih olj (laneno, sončnično, sojino itd.), alkidnih smol, hlapnih sestavin (npr. dearomatiziranega lak bencina) z železovim oksidom in organskimi pigmenti, sikativi (sušilnimi sredstvi) in dodatki za vodoodbojnost. Kokosovo olje je bilo zaradi svoje trdne narave pred uporabo segreti na 50 °C. Olja smo na les nanесли z gobico v dveh slojih, preostalo olje s površine pa odstranili s čisto krpo. Maso nanesenih olj smo določili gravimetrično.

2.1 DOLOČANJE NAVZEMA OLJ IN VODE S TENZIOMETROM

2.1 DETERMINATION OF OIL AND WATER UPTAKE WITH A TENSIO METER

Glavne poti za penetracijo tekočine v les predstavljajo lumni celic, odprtine v celičnih stenah (piknje) in morebitne razpoke na vzdolžnih površinah (Zlahtic et al., 2015). Vse meritve navzema tekočin so

bile izvedene pri sobni temperaturi ($\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) in relativni zračni vlažnosti (60 ± 5) % z instrumentom Tensiometer K100MK2 (Krüss, Nemčija), po prirejenem standardu SIST EN 1609 (1997). Vzorci so bili nameščeni tako, da smo nepremazane oz. premazane površine potopili v olja oz. vodo in njihove mase neprekinjeno merili vsaki 2 s v času 200 s. Hitrost pred dotikom s tekočino je bila $6\text{ mm}\cdot\text{min}^{-2}$, občutljivost meritve kontakta 0,005 g, globina potopitve pa je bila nastavljena na 1 mm. Glede na končno maso in površino prečnega prereza potopljenega vzorca smo izračunali količino vode in olj v $\text{g}\cdot\text{mm}^{-2}$.

2.2 DOLOČANJE STOPNJE UTRJENOSTI PREMAZOV (PRIREJENA METODA BANDOW-WOLFF)

2.2 DETERMINATION OF THE DRYING STAGE OF COATINGS (MODIFIED DANDOW-WOLFF METHOD)

Stopnje utrjenosti nanosenih olj smo določili v skladu s standardom DIN 53 150 (2002). Okrogel list papirja (premer: 26 mm, površinska masa: $80\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) smo postavili na premazano površino in ga obremenili s 5, 50, 500 in $5.000\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ za čas 60 s. Po tem času smo obremenitev in papir odstranili ter določili stopnjo utrjenosti.

2.3 ANALIZA Z VRSTIČNIM ELEKTRONSKIM MIKROSKOPOM (SEM)

2.3 SCANNING ELECTRON MICROSCOPY (SEM) INVESTIGATIONS

Morfologijo vzorcev, na katerih so bile predhodno opravljene meritve absorpcije vode s tenziometrom, smo proučevali z analizo z vrstičnim elektronskim mikroskopom (angl. scanning electron microscope, SEM). Namen tega je bil dobiti vpogled za razlike v navzemu vode med premazanimi vzorci na mikroskopski ravni. Slike so bile narejene s SEM mikroskopom FEI Quanta 250, pri $100\times$ povečavi, v delnem vakuumu (60 Pa), delovno napetostjo 10 kV in pri resoluciji 3.0 (*»spot size«*).

2.4 MERJENJE KONTAKTNIH KOTOV

2.4 DETERMINATION OF CONTACT ANGLES

Kontaktne kote destilirane vode na oljenih površinah vzorcev iz bukovine smo izmerili z metodo kapljice, z optičnim goniometrom Theta (Biolin Scientific Oy, Espoo, Finska). Po kalibraciji je bil mikroskop goniometra izostren in naravn na sliko

kapljice. Kontaktni koti so bili izmerjeni po načinu analize kontaktnega kota Young-Laplace, v programski opremi OneAttension različice 2.4 (r4931) (Biolin Scientific). Oblike kapljic smo opazovali z optičnim goniometrom in jih posneli z digitalnim fotoaparatom, nameščenim v osnem podaljšku leče. Kapljice s prostornino $5\text{ }\mu\text{L}$ smo nanegli 21 dni po nanosu olj na polradialne površine na treh različnih mestih, 20 mm med seboj, na pet vzporednih oljenih vzorcev. Za eno vrsto oljenih vzorcev je bilo skupno določenih 15 kontaktnih kotov. Snemanje slike je bilo nastavljeno na 63 s (1,3 slik na sekundo), čas, ko smo kote začeli izračunavati (0 s), pa je bil ob umiku konice dozirnika od kapljice, kar se je zgodilo približno 2 s po prvem stiku kapljice s substratom. Meritve smo izvajali pri konstantni temperaturi $23\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.5 PRESKUSI ODPORNOSTI POVRŠIN

2.5 SURFACE RESISTANCE TESTS

Odpornost proti različnim hladnim tekočinam je bila določena v skladu s standardom SIST EN 12720 (2009). Papirnate diske (premer: 25 mm, $480\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) smo potopili v preskusno tekočino (pri temperaturi $(23 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$) za 30 sekund, jih položili na oljeno površino in jih za čas preskusa pokrili s standardiziranim steklenim pokrovom. Po pretečenem času smo steklene pokrove in papirnate diske odstranili. Odpornost proti suhi toploti ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$) smo določili v skladu s standardom SIST EN 12722 (2009). Po 20 urah so bile površine očiščene in ocenjene v skladu s številčnimi oznakami, opredeljenimi v standardu (od 1 do 5), pri čemer je 5 najboljša ocena (brez vidnih sprememb) in 1 najslabša.

2.6 MERITVE BARVE IN SIJAJA

2.6 COLOUR AND GLOSS MEASUREMENTS

Spremembe barve so med prvimi in najpreprostejšimi kazalniki sprememb v lesu ali v površinskem sistemu, bodisi zaradi izpostavitve na prostem ali zaradi staranja med uporabo v interieru. CIE (Komisija Internationale de l'Eclairage) L^* , a^* in b^* parametre smo izmerili s spektrofotometrom X-Rite (USA) SP62 z uporabo svetlobnega vira tipa D65. Razlike v površinski barvi vzorca (ΔE^*) po 21 dneh in 365 dneh po postopku nanašanja smo izračunali z uporabo enačbe (1),

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

kjer so ΔL^* , Δa^* in Δb^* spremembe med končno in začetno vrednostjo L^* , a^* in b^* .

Sijaj površin vzorcev smo merili z instrumentom X-Rite AcuGloss TRI pri vpadnem kotu svetlobe s svetlobnega vira 60° in 85°, v skladu s standardom SIST EN 2813 (1997).

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 NAVZEM OLJ V BUKOVINO

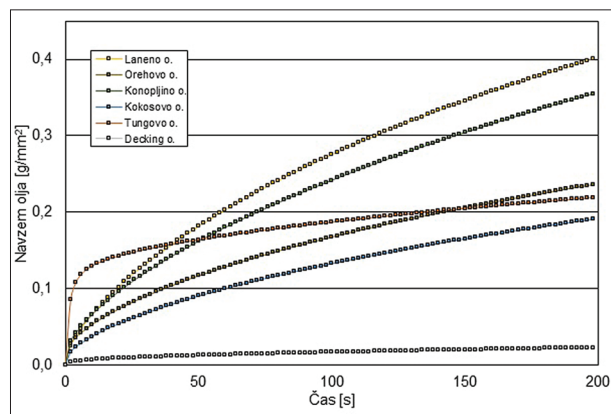
3.1 UPTAKE OF OILS BY BEECH WOOD

Zaradi trdnega agregatnega stanja utrjenih sušičih olj, le-ti lahko zelo učinkovito popolnoma zaprejo prečno prerezane kapilare v lesu (Van Eeckevel et al., 2001). Rezultati meritev navzema različnih vrst olj preko čelnih površin v vzorce bukovega lesa (slika 1), kažejo, da se je v les najmanj vpilo olje decking. Začeten hiter in kasneje upočasnjjen navzem tungovega olja je lahko posledica pojava, da je del olja najprej prodrl v les, nato pa je njegovo strukturo zaprl in preprečil nadaljnje navzemanje olja.

3.2 ČAS SUŠENJA OLJ

3.2 DRYING TIME OF OILS

Kot je razvidno iz preglednice 1, je konopljinolje za to, da je doseglo najvišjo stopnjo utrjenosti,



Slika 1. Navzem različnih vrst olj preko čelnih površin v vzorce iz bukovine.

Figure 1. Uptake of different kinds of oils by beech wood samples, through cross-cut surfaces.

Preglednica 1. Čas utrjevanja do najvišje stopnje utrjenosti posameznih olj.

Table 1. Time needed to reach the highest drying stage for different oils.

Vrsta olja	Laneno	Orehovo	Konopljinolje	Kokosovo	Tungovo	Decking
Čas potreben za doseglo najvišje stopnje utrjenosti [dni]	7	4	14	1	2	1

potrebovalo največ časa. Najkrajši čas je bil ugotovljen za kokosovo olje in olje decking. Kratek čas utrjevanja kokosovega olja lahko pojasnimo s tem, da v tem primeru ne gre za utrjevanje z oksidacijo, temveč le za tvorbo utrjene plasti pri prehodu olja iz tekočega v trdno stanje pri sobni temperaturi. Na splošno lahko rečemo, da so časi utrjevanja olj predolgi za industrijske aplikacije, zato te čase običajno skrajšajo z dodajanjem sikativov (Wang et al., 2008). Rezultati časov sušenja za laneno in tungovo olje (preglednica 1) potrjujejo pojasnilo Wanga in Padue (Wang & Padua, 2010). Avtorja sta ugotovila, da se v prvih fazah utrjevanja lanenega olja tvori zaprta plast, ki upočasnjuje difuzijo kisika v spodnje plasti olja in s tem upočasnjuje proces utrjevanja. Po drugi strani pa je zgornja plast utrjenega tungovega olja ostala za kisik prepustna.

3.3 OPAZOVANJA Z VRSTIČNIM ELEKTRONSKIM MIKROSKOPOM

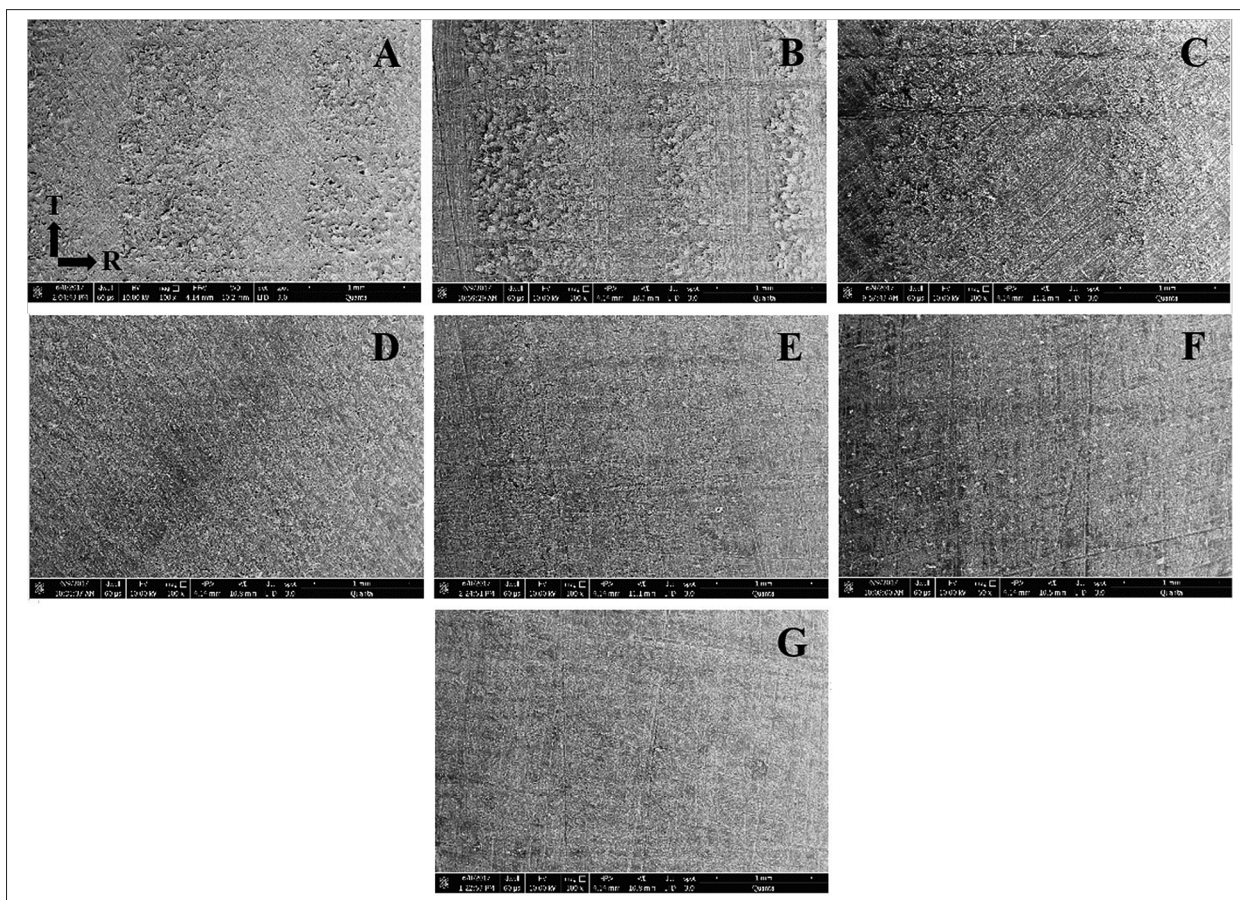
3.3 SCANNING ELECTRON MICROSCOPY INVESTIGATIONS

Kot je razvidno iz posnetkov na sliki 2, na kontrolnem vzorcu (nepremazana bukovina), je rani les bolj porozen kot kasni les. Poroznost vzorcev, premazanih z orehovim in konopljinim oljem, je precej podobna nepremazanim vzorcem. Les, premazan s kokosovim in lanenim oljem, je nekoliko manj porozen, les, premazan z oljem decking in tungovim oljem pa je precej gladek in neporozen.

3.4 KONTAKTNI KOTI VODE

3.4 WATER CONTACT ANGLES

Merjenje navideznega kontaktnega kota vode z metodo kapljice je hiter in primeren način za vrednotenje učinkovitosti vodoodbojnih površinskih sredstev. Kot je prikazano na sliki 3, se je kontaktni kot kapljice vode, merjen 2 s po ločitvi kapljice od konice dozirnika, po oljenju lesa močno povečal. Učinek hidrofovizacije je bil najbolj očiten pri lane-nem in tungovem olju, ter olju decking, kjer se



Slika 2. Posnetki prečnih površin vzorcev, premazanih z različnimi olji, narejeni z elektronskim vrstičnim mikroskopom pri 100 × povečavi (A – Kontrolni vzorec, B – Orehovo, C – Konopljino, D – Kokosovo, E – Laneno, F – Tungovo, G – Decking).

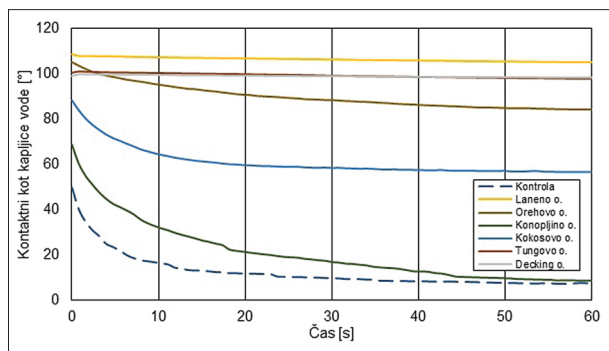
Figure 2. SEM micrographs of the specimens' oiled axial surfaces taken with 100 × magnification, after water uptake measurements (A – Control, B – Walnut, C – Hemp, D – Coconut, E – Flax, F – Tung, G – Decking).

kapljica vode v les ni vpila tudi po eni minuti po nanosu, vrednosti pa so bile zelo podobne. To opažanje sovпада z ugotovitvami opazovanja oljenih površin z vrstičnim elektronskim mikroskopom (slika 2). Prav pri površinah, ki so po oljenju postale najbolj zaprte, je bilo vpijanje vode v les oz. manjšanje kontaktnega kota vode v času od nanosa kapljice najmanjše (laneno in tungovo olje ter olje »decking«). O izraziti hidrofobni učinkovitosti tungovega olja poroča tudi Kick et al., (2017). Kontaktni kot vode na površini, premazani s kokosovim in konopljinim oljem, pa se je v povprečju v eni minuti od nanosa zmanjšal za približno 32° oz. 60°, kar pomeni, da je les, oljen s kokosovim in konopljinim oljem, še vedno vpijal vodo.

3.5 NAVZEM VODE V OLJENO BUKOVINO

3.5 WATER UPTAKE BY OILED BEECH WOOD

Čelne površine lesa, premazane z olji, v primerjavi z nepremazanimi navzamejo manj vode. Kot je prikazano na sliki 4, vsa izbrana olja navzema vode ne preprečujejo enako. Rezultati so pokazali, da olje decking najbolj učinkovito preprečuje vpijanje vode. Vzorci, premazani s tungovim, lanenim in kokosovim oljem do neke mere še vedno ovirajo penetracijo vode v strukturo lesa. Bariera, ustvarjena z orehovim in konopljinim oljem, pa je manj učinkovita. Rezultati navzema vode v oljen les, skupaj z ugotovitvami določanja kontaktnih kotov in preiskav površin z vrstično elektronsko mikroskopijo torej kažejo na to, da po svojem vodoodbojnem učinku izstopajo olje decking, tungovo in laneno olje.



Slika 3. Kontaktne koti kapljice vode na površinah, premazanih z različnimi olji, v odvisnosti od časa po nanosu kapljice.

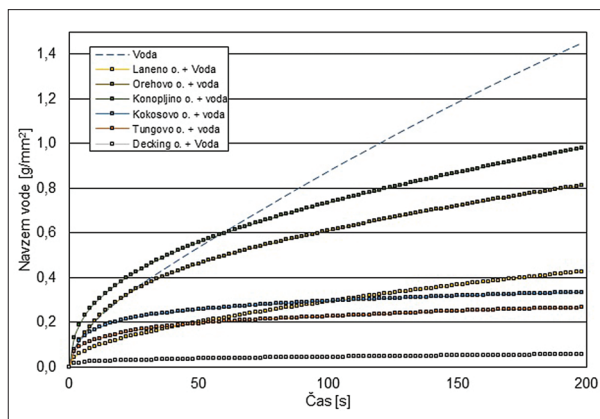
Figure 3. Contact angles of water on surfaces finished with different oils, depending on the time after drop deposition.

3.6 ODPORNOSTNE LASTNOSTI POVRŠIN

3.6 RESISTANCE PROPERTIES OF THE SURFACES

Odpornost proti hladnim tekočinam je za premazane lesene površine izjemnega pomena. Ocenitev premazanih lesenih površin na hladne tekočine in suho toploto smo ocenili po vizualno zaznani spremembi barve, sijaja ali katerekoli druge poškodbe, potem ko smo odstranili papir, ki je vseboval določene tekočine oz. po odstranitvi segretyh diskov (preglednica 2).

Odpornost proti čistilnemu sredstvu je bila pri vseh vrstah olj dobra, razen pri kokosovem olju, kjer



Slika 4. Navzem vode v bukov les, premazan z različnimi olji, preko čelnih površin.

Figure 4. Water uptake by oiled beech wood samples, through cross-cut surfaces.

so bile opažene manjše poškodbe. Bazični znoj je bolj negativno vplival na površine kot kislinski. Površine so bile precej dobro odporne proti 48 % vodni raztopini etanola, v primeru olja pa so bile opažene majhne poškodbe. V nasprotju z drugimi uporabljanimi olji so površinski sistemi, ki so bili premazani s tungovim oljem in oljem decking, dosegli dobro odpornost proti kavi, tudi po daljšem obdobju testiranja. Aceton je po 10 minutah delno poškodoval površine, premazane s kokosovim, tungovim oljem in oljem decking. Odpornost površin proti vodi je bila najslabša pri površinah, premazanih s kokosovim,

Preglednica 2. Ocene odpornosti površin.

Table 2. Assessments of surface resistances.

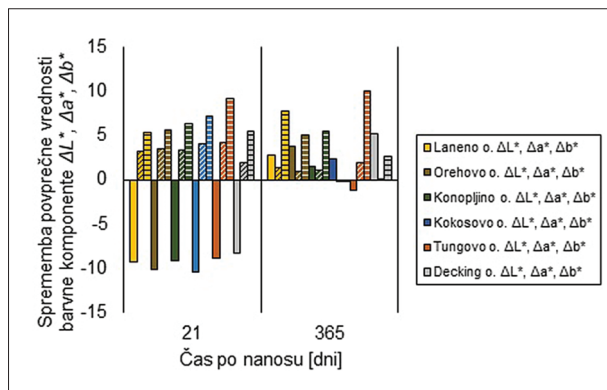
Preskus odpornosti površine		Čas preskusa	Vrsta olja, ocena					
			Laneno	Orehovo	Konopljin o.	Kokosovo	Tungovo	Decking
Čistilno sredstvo		6 ur	5	4	4	4/3	5	5
Znoj	Kislina	1 ura	4	5	4	4/3	5	5
	Baza	1 ura	4	4	4/3	4/3	5	5
Etanol (48 % vodna raztopina)		1 ura	5	5	5	4	5	4/3
Kava		10 min.	3	2	2	3/2	5	5
		1 ura	2	1	1	2/1	5	5
		6 ur	-	-	-	1	3/2	4
Aceton		2 min.	5	5	5	5	5	5
		10 min.	5	5	5	4	4	4
Voda		1 ura	5	5	5	4	5	5
		6 ur	3	3	4/3	2	5	4
Odpornost proti suhi toploti (60 °C)		20 min.	5	4	4	3	5	4

lanenim in orehovim oljem. Kokosovo olje je bilo najslabše ocenjeno pri odpornosti proti suhi toploti, sledilo je orehovo, konopljinu olje in olje decking, kot najboljši pa sta se izkazali laneno in tungovo olje.

3.7 SPREMEMBE BARVE IN SIJAJA

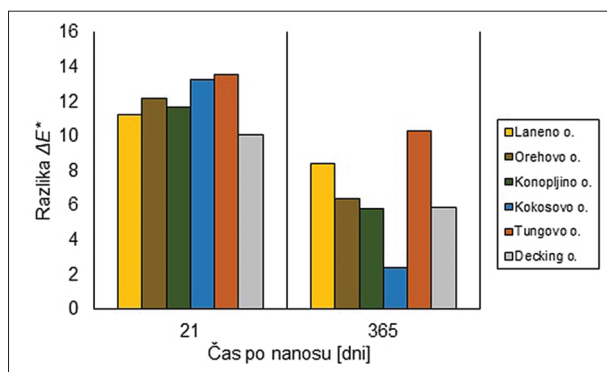
3.7 CHANGES OF COLOUR AND GLOSS

V barvnem sistemu CIELAB, L^* predstavlja svetlost vzorca in variira od 0 (črna) do 100 (bela); a^* predstavlja zeleno ($-a^*$) do rdeče ($+a^*$) os in b^* je modra ($-b^*$) do rumena ($+b^*$) os (Cheumani-Yona



Slika 5. Povprečne spremembe barvnih parametrov oljene bukovine L^* (polni stolpci), a^* (stolpci s poševnim vzorcem), b^* (stolpci s horizontalnim vzorcem) 21 dni in 365 dni po nanosu različnih vrst olj.

Figure 5. Average changes of the values of colour parameters of the oiled beech wood L^* (filled columns), a^* (columns with oblique patterns), b^* (columns with horizontal patterns) 21 days and 365 days after application of different kinds of oils.



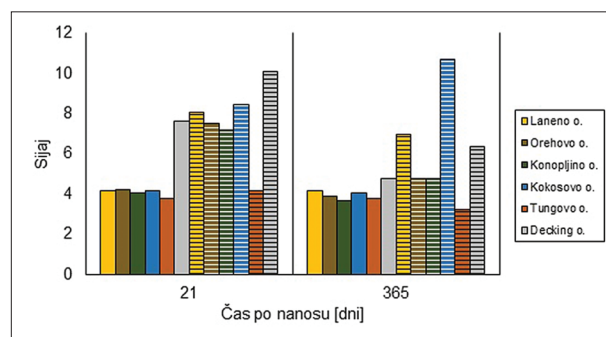
Slika 6. Sprememba barve ΔE^* 21 dni in 365 dni po nanosu različnih vrst olj.

Figure 6. Colour difference ΔE^* 21 days and 365 days after application of different kinds of oils.

et al., 2015). V raziskavi smo spremljali spremembo barve iz dveh razlogov: z estetskega vidika je zaželeno, da se barva oljenega lesa določen čas po končanem oljenju ne spreminja več. Prav tako pa je spreminjanje barve lahko pokazatelj kemičnih procesov med utrjevanjem olja oz. pokazatelj, ali je utrjevanje zaključeno ali še ne. Na slikah 5 in 6 so prikazane izmerjene povprečne komponente barvnega prostora, njihove izračunane relativne spremembe in barvne razlike, kot posledica procesov staranja med hranjenjem obdelanega lesa pri običajnih delovnih laboratorijskih pogojih (vlažnost, temperatura), v temi.

V 21 dneh po nanosu olja se je barva najbolj spremenila pri vzorcih, premazanih s tungovim in kokosovim oljem, nekoliko manj pa pri vzorcih, premazanih z orehovim, konopljinim, lanenim oljem in oljem decking. Površine so postale temnejše, bolj rdeče in rumene. Po enem letu so barvne spremembe premazanih površin v primerjavi s prejšnjimi meritvami najbolj opazne pri vzorcih, premazanih s tungovim in lanenim oljem, sledijo orehovo in konopljinu olje. Najmanjše spremembe so bile opazene pri vzorcih, premazanih s kokosovim oljem.

Kot je prikazano na sliki 7, se po nanosu olja poveča sijaj površin. Vrednosti sijaja, izmerjene vzporedno s smerjo poteka lesnih vlaken, so bile precej podobne, razen pri olju decking, kjer so bile vrednosti sijaja približno enkrat višje kot pri drugih oljih. Po enem letu se je sijaj površin še povečal.



Slika 7. Povprečne vrednosti sijaja 21 dni in 365 dni po nanosu različnih vrst olj v smeri vzporedno (polni stolpci) in pravokotno (stolpci s horizontalnimi vzorci) glede na potek lesnih vlaken.

Figure 7. Average gloss values 21 days and 365 days after application of different kinds of oils in directions parallel (filled columns) and perpendicular (columns with horizontal patterns) to the wood grain.

Vrednosti sijaja, izmerjene prečno na smer poteka lesnih vlaken, so se bolj razlikovale. Ponovno je bil porast na začetku najvišji pri olju decking, najnižji pa pri tungovem olju. Druge meritve so pokazale najvišjo spremembo pri kokosovem olju, vendar so bile spremembe sijaja drugih olj še vedno prisotne.

4 ZAKLJUČEK

4 CONCLUSION

V raziskavi je bilo ugotovljeno, da naravna sušča olja potrebujejo dalj časa, da tvorijo utrjen sloj na površini premazanega bukovega lesa. Po nanosu različnih vrst uporabljenih olj so bile opažene precejšnje barvne spremembe. Tri tedne po nanašanju na les prevlečene površine postanejo temnejše, bolj rdeče in bolj rumene. Po enem letu od nanosa so bile še vedno opazne spremembe barve, vendar so površine postale nekoliko svetlejše. Vsa nanesena olja so povečala sijaj substrata.

S povzetkom rezultatov testov odpornosti, ki so bili izvedeni v skladu s standardi, se je pokazalo, da so tungovo olje, olje decking in laneno olje med olji, ki so bila uporabljena v tej raziskavi, najbolj primerna za zaščito površine bukovine. Slabše odpornostne lastnosti so bile določene pri površinah, premazanih z orehovim, konopljinim in kokosovim oljem.

Med rezultati meritev navzema vode s tenziometrom in rezultati meritev kontaktnih kotov vode z goniometrom lahko najdemo nekatere podobnosti. Vzorci, premazani z lanenim oljem, tungovim oljem in oljem decking, so izkazovali najvišje kontaktne kote kapljic vode in prav v les, obdelan s tem oljem, je bilo vpijanje vode najmanjše. Orehovo, kokosovo in konopljino olje niso preprečili vpijanja kapljic vode v podlago. Primerjava rezultatov meritev navzema vode in opazovanja čelnih površin oz. njihove poroznosti z vrstičnim elektronskim mikroskopom prav tako pokaže korelacije: vpijanje vode je bilo večinoma upočasnjeno pri uporabi olja decking, tungovega, kokosovega in lanenega olja, ki so prečno prerezane celice lesa zaprli z utrjenim slojem.

Če bi se na osnovi opisanih rezultatov odločali, katero olje izbrati za površinsko zaščito bukovega lesa, bi pri odločitvi morali upoštevati dejstvo, da ima vsako olje svoje prednosti in slabosti. O tem, katere lastnosti so za uporabnika bolj pomembne, se mora odločiti vsak sam. Po naši presoji pa se je med naravnimi olji najboljše izkazalo tungovo olje.

5 POVZETEK

5 SUMMARY

Increased environmental awareness in recent years, and the consequent spread of policies favouring the use of renewable resources and environmentally friendly chemicals, have led to increased interest in "non-biocidal," environmentally friendlier methods of wood protection. The term "non-biocidal" includes natural oils, waxes, silicones, resins, polymers, chemical modifications, and heat treatments. Natural oils appear to be capable of preventing water uptake by wood. Unsaturated – drying oils are oxidized when exposed to atmospheric oxygen, and the cured layer on surface of wood may provide an additional water barrier. Therefore, natural oil based finishes and water repellent agents for wood have been reported in different studies. For instance, tung oil was proven to improve the water repellency and dimensional stability of thermally modified European aspen wood. Impregnation of Scots pine sapwood with linseed oil, coconut oil and various tall oils was also reported to increase the water repelling characteristics of wood.

The aim of this research was thus to apply five different types of natural oils and one type of synthetic oil in order to increase the hydrophobicity of European beech wood and improve its resistant properties. Linseed, walnut, hemp, coconut, tung and the commercial decking oil were used.

The material utilised was European beech (*Fagus sylvatica* L.) wood. Before application of the oils, surfaces were sanded with sanding paper, grid P150. The oils were applied on wood with a sponge in two-steps, and the oil remaining on the surface was removed with a clean rag. Before application the coconut oil was heated to 50 °C, due to its solid nature at room temperature. Oil uptake by wood was determined by application of a tensiometer and the mass of the applied oils was determined gravimetrically. Determination of the drying stage of the oil finishes was carried out by the modified Bandow-Wolff method. Measurements of water uptake by wood with oiled surfaces were also performed with a tensiometer. The sessile drop method with a goniometer was applied to determine the contact angles of distilled water on the oiled beech wood surfaces. The resistance properties tested were selected in terms of the potential use of oiled beech wood for production of wooden jewellery. Finally,

the colour gloss changes of oiled wood after 21 days and after one year of application of the oils were assessed, predominantly from the aesthetic point of view but also as an indicator of the drying process.

The results of the uptake measurements of the oils through cross-cut surfaces into beech wood specimens showed that the uptake of the commercial decking oil was the lowest. Tung oil at first penetrated into the wood quickly, but the absorption later slowed down because the oil that was absorbed first closed the wood's pores and prevented further absorption, as seen in the SEM observations of the oiled surfaces. The time needed to reach the highest drying stage varied between one and 14 days. The fastest drying was observed for the decking and coconut oils, and the longest was recorded for hemp oil.

Measurements of the apparent contact angles of water on the oiled surfaces demonstrated the hydrophobisation efficiency of linseed, tung and decking oils. On the other hand, this effect was much less expressed in the case of walnut oil. The contact measurement results were coincident with the determined absorption of water into the oiled wood specimens. While the lowest water uptake was shown in the case of wood treated with the decking oil, somewhat higher uptake of water was observed in the case of tung, linseed and coconut oils, and the barrier properties of walnut and hemp oils were considerably less effective. Moreover, these results were quite consistent with the observed resistance against various cold liquids and dry heat. The resistance against the cleaning agent was good for all types of oils, except for coconut. The basic perspiration model liquid affected the oil surfaces more negatively than the acid one. The surfaces were quite resistant against a 48 % aqueous solution of ethanol. In contrast to the other oils used, the surface systems finished with tung and decking oils had good resistance against coffee, even after a prolonged test period. The resistance against water was the poorest for those surfaces coated with coconut, linseed and walnut oils.

At 21 days after application of the oils the colour changed most significantly for the samples coated with tung and coconut oils, and a little bit less for those with walnut, hemp, flax and decking oils. The surfaces became darker, and more reddish and yellowish. After one year, the colour changes of the coated surfaces were the most noticeable for the

samples finished with tung and linseed oils, followed by walnut, decking and hemp oils. The smallest changes were observed in the case of coconut oil. The gloss of the surfaces increased after application of the oils, and after one year the surfaces became even glossier.

The present research found that natural drying oils have a large range of required time to form a cured layer on the surface of beech wood. A considerable colour difference was also noticed after application, signifying that a change in colour occurred. Three weeks after application on wood, the coated surfaces became darker, redder and yellowish. One year later, some changes in colour were still observed, but in comparison with the first observations the surfaces became a little bit lighter. All of the applied oils increased the gloss of the substrates.

When summarizing the results of the resistance tests, it can be concluded that the tung, decking and linseed oils were the most protective. Lower resistance was determined for the surfaces coated with walnut, hemp and coconut oils. The highest apparent contact angles of water were observed for the samples treated with the linseed, tung and decking oils. On the other hand, walnut, coconut and hemp oils did not prevent droplet penetration into the treated wood.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENT

Za pripravo prispevka se zahvaljujemo Javni agenciji za raziskovalno dejavnost (ARRS) in programski skupini P4-0015, ki jo financira ARRS.

LITERATURA

REFERENCES

- Ahmed, A. S., Sehlstedt-Persson, M., Hansson, L., & Morén, T. (2013). Evaluation of preservative distribution in thermally modified European aspen and birch boards using computed tomography and scanning electron microscopy. *Journal of Wood Science*, 59, 57–66.
- Ahmed, A. S., Morén, T., Sehlstedt-Persson, M., & Blom, Å. (2017). Effect of oil impregnation on water repellency, dimensional stability and mold susceptibility of thermally modified European aspen and downy birch wood. *Journal of Wood Science*, 63, 74–84.
- Bawalan, D. D., & Chapman, R. K. (2006). *Virgin coconut oil: production manual for micro- and village-scale processing*. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, 80 str.

- Budija, F. (2008). Tungovo olje. *LesWood*, 60, 4, 142–147.
- Callaway, C. J. (2004). Hempseed as a nutritional resource: An overview. *Euphytica*, 140, 65–72.
- Cheumani-Yona, M. A., Budija, F., Hrastnik, D., Kutnar, A., Pavlič, M., Pori, P., Tavzes, Č., & Petrič, M. (2015). Preparation of two-component polyurethane coatings from bleached liquefied wood. *BioResources* 10, 2, 3347–3363.
- DIN 53 150 (2002). Bestimmung des Trockengrades von Beschichtungen (Abgewandeltes Bandow-Wolff-Verfahren). German Institute for Standardization, Berlin, Germany.
- Humar, M., & Lesar, B. (2013). Efficacy of linseed- and tung-oil-treated wood against wood-decay fungi and water uptake. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, 223–227.
- Hyvönen, A., Pilttonen, P., & Niinimäki, J. (2005). Biodegradable substances in wood protection. Jalkanen, A., Nygren, P.: Sustainable use of renewable natural resources - from principles to practices. University of Helsinki Department of Forest Ecology Publications 34, Helsinki, Finland.
- Kick, T., Grethe, T., & Mahltig, B. (2017). A Natural Based Method for Hydrophobic Treatment of Natural Fiber Material. *Acta Chimica Slovenica*, 64, 373–380.
- Kumar, V. P. K., & Sethuraman, G. M. (2004). Studies on oleoresinous varnishes and their natural precursors. *Progress in Organic Coatings*, 49, 244–251.
- Pogorelčnik, A. (2017). Ocena primernosti različnih naravnih olj za površinsko obdelavo lesenega nakita. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani.
- Sailer, M., Rapp, A.O., & Leithoff, H. (2000). Improved resistance of Scots pine and spruce by application of an oil-heat treatment. The international research group on wood preservation. Document no. IRG/WP 00-40162. Stockholm, 17 str.
- Shim, Y. Y., Gui, B., Arnison, G. P., Wang, Y., & Reaney, T. J. N. (2014). Flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) bioactive compounds and peptide nomenclature: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 38, 5–20.
- Singh, T., & Singh, P. A. (2015). A review on natural products as wood protectant. *Wood Sci Technology* 46, 851–870.
- SIST EN 1609 (1997). Thermal insulating products for building applications - Determination of short term water absorption by partial immersion. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- SIST EN 2813 (1997). Paints and varnishes - Determination of specular gloss of non-metallic paint films at 20°, 60° and 85°. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- SIST EN 12720 (2009). Furniture - Assessment of surface resistance to cold liquids. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- SIST EN 12722 (2009). Furniture - Assessment of surface resistance to dry heat. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Van Eeckevel, A., Homan, W. J., & Militz, H. (2001). Water repellency of some natural oils. In: COST Action E22: Environmental optimisation of wood protection. Conference in Reinbek, Germany, 8-10 November 2001.
- Wang, Y., & Padua, G. W. (2010). Structure Characterization of Films from Drying Oils Cured Under Infrared Light. *Journal of Applied Polymer Science*, 115, 2565–2572.
- Wang, Y., Wang, Q., Artz W. E., & Padua, G. W. (2008). Fourier Transform Infrared Spectra of Drying Oils Treated by Irradiation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 3043–3048.
- Zlahtic, M., Thaler, N., & Humar, M. (2015). Water Uptake of Thermally Modified Norway Spruce. *Drvena Industrija*, 66, 4: 273–279.
- Žlahtič, M., Mikac, U., Serša, I., Merela, M., & Humar, M. (2017). Distribution and penetration of tung oil in wood studied by magnetic resonance microscopy. *Industrial Crops and Products*, 96, 149–157.

ANALIZA POSLOVANJA SLOVENSKE LESNE PANOGE

SLOVENIAN WOOD INDUSTRY SECTOR ANALYSIS

Jože Kropivšek^{1*}, Igor Milavec², Bernard Likar²

UDK 630*791.2

Izvleček / Abstract

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Izvleček: Panoga, ki znotraj ekonomije zavzema strateško pomembno vlogo, je deležna številnih gospodarskih ukrepov, ki vplivajo na njen dolgoročni razvoj. Namen tega prispevka je zato pokazati stanje v lesni panogi v Sloveniji ter oceniti njen položaj v gospodarstvu in razvoj v zadnjih letih. Rezultati kvalitativne in kvantitativne analize kažejo na izboljšanje ključnih finančnih kazalnikov v panogi, kakor tudi njenega kvalitativnega položaja v celotnem gospodarstvu in gospodarski politiki države. Opažamo rast panoge v prihodkih, številu zaposlenih, dodani vrednosti na zaposlenega in še nekaterih drugih ključnih kazalnikih uspešnosti. Rast panoge pozitivno vpliva tudi na njeno javno podobo in s tem na razvojne in investicijske potenciale panoge, vlaganja v raziskave in zaposlovanje. Povezovanje podjetij in ostalih institucij znotraj panoge in navzven je pri tem nujno. Predvsem pa morajo podjetja nadaljevati z uvajanjem najsodobnejših proizvodnih in informacijskih tehnologij v prehodu v industrijo 4.0 in posodabljanjem njihovih poslovnih modelov.

Ključne besede: analiza poslovanja, finančni kazalniki, SWOT, lesarstvo, Slovenija

Abstract: The sector, which plays a strategically important role within the economy, is subjected to numerous economic measures that influence its long-term development. The purpose of this article is to analyse the situation in the Slovenian wood industry and evaluate its position in the economy and its development in the last few years. The results of qualitative and quantitative analyses show improvements in a number of key financial indicators in the sector, as well as its qualitative situation in the context of Slovenia's overall economic and political scene. Turnover, number of employees, added value and some other key performance indicators have all increased recently. The growth of the sector has a positive effect on public perceptions of it, which then influences the developmental and investment potential of the industry, with positive impacts on employment and further investment in research. Such growth also helps companies enhance their networking both inside and outside the sector. Overall, companies should continue with their efforts to introduce the latest production and information technologies as part of the transition to an Industry 4.0 model, while also updating of their business models.

Keywords: sector analysis, financial indicators, SWOT, wood-industry, Slovenia

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Poslovanje posamezne panoge, ki jo razumemo kot »skupino podjetij, ki proizvajajo in prodajajo podobne ali identične izdelke oz. storitve« (Samuelson & Nordhaus, 2002), je pogosto tesno povezano z njeno vlogo v strateških gospodarskih usmeritvah širšega gospodarskega okolja na nivoju države oz. tudi širše. Panoga, ki zavzema strateško pomembno vlogo, je deležna številnih gospodarskih ukrepov, od javnih razpisov za subvencioniranje vlaganj v raz-

iskave in razvoj, do izvajanja promocijskih dejavnosti za doseganje večje prepoznavnosti panoge in s tem mesta v družbi. Slednje se pri poslovanju podjetij v panogi kaže v obliki lažjega vstopa na trg, boljše pozicije na trgu zaradi dobrega imena panoge pa vse do pridobivanja sposobn(ejš)ega strokovnega kadra, ki je osrčje njenega razvoja.

Lesnopredelovalna panoga v Sloveniji je sodeč po nekaterih ocenah v zadnjih nekaj letih po skoraj četrstoletnem krčenju doživela razmeroma stabilno rast (Likar & Valentinčič, 2017). Pot do te rasti pa je bila dolga in težka. Velika težava panoge je bila, da se je v letih 1990 do 2010 njen položaj v gospodarskih politikah države slabšal, podobno kot pri ostalih delovno intenzivnih panogah, ki imajo praviloma nižjo dodano vrednost na zaposlenega kot kapitalno intenzivna podjetja. Podjetja in panožne podporne insti-

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenija

* e-pošta: joze.kropivsek@bf.uni-lj.si

² Gospodarska zbornica Slovenije, Dimičeva 13, 1000 Ljubljana, Slovenija

tucije so si (tudi v okviru Združenja lesne in pohištvene industrije pri Gospodarski zbornici Slovenije) od leta 2008 dalje intenzivno prizadevala za izboljšanje panožnega položaja. Načrt je bil oblikovati samostojno sektorsko gospodarsko politiko po vzoru turističnega sektorja (Strategija trajnostne ..., 2017), saj v sklopu horizontalne politike, ki jo Vlada RS izvaja za vse predelovalne dejavnosti skupaj, ni bilo mogoče oblikovati učinkovitih in uspešnih ukrepov za prestrukturiranje lesnopredelovalne industrije.

V analitični praksi se pogosto uporabljajo različni izrazi za analizo poslovanja, vsem pa je skupno, da se osredotočajo na nek vidik poslovanja. Analiza poslovanja je med temi najširši pojem, ki večinoma temelji na finančni analizi. Poslovna analiza je disciplina, ki prepoznava poslovne potrebe in išče rešitve za konkretne poslovne izzive. Močno se prepleta s funkcijo analize poslovnih potreb, a s to razliko, da pogosto vsebuje tudi razvoj sistema ali komponente. Prav tako je poslovna analiza pogosto povezana z organizacijskimi spremembami, izboljšavami procesov, strateškim načrtovanjem in razvojem različnih poslovnih politik. Tehnike poslovne analize zajemajo orodja, kot je na primer SWOT analiza. Poslovna analitika pa je zbirka orodij, tehnik in znanj, ki omogočajo raziskati pretekle poslovne rezultate in napovedovati prihodnje poslovne dogodke. Glavni cilj poslovne analitike je pridobivanje boljšega vpogleda v poslovanje in iskanje pravih odgovorov/informacij, ki bodo odgovornim v pomoč pri sprejemanju kar najboljših poslovnih odločitev. Poslovna analitika zajema statistične in kvantitativne analize, tehnike rudarjenja podatkov, napovedne modele in preizkuse različnih scenarijev/kombinacij (Seliškar, 2017).

Namen tega prispevka je s podrobno analizo in obdelavo podatkov o poslovanju panoge pokazati (kvalitativno kot kvantitativno) stanje v lesarstvu v Sloveniji ter (objektivno) oceniti njen položaj v gospodarstvu in razvoj v zadnjih letih.

2 MATERIALI IN METODE

2 MATERIALS AND METHODS

V okviru raziskave smo preučili javno dostopne dokumente o stanju in razvoju gospodarske politike v Sloveniji in na osnovi njihove analize ocenili kvalitativno stanje lesne panoge v Sloveniji. Ta panoga obsega dejavnosti C16 (Obdelava in predelava lesa) in C31 (Proizvodnja pohištva) (Braunsberger et al., 2010).

Kvantitativno analizo smo izvedli z izračunom nekaterih finančnih kazalnikov panoge na osnovi poslovnih (in finančnih) poročil podjetij, ki delujejo v njej. Podatki so bili pridobljeni iz uradnih virov (Ajpes, 2016; Kazalniki poslovanja GZS ..., 2017), agregirani in obdelani v agregirani obliki. Finančni podatki so se v večini primerov nanašali na vse oblike gospodarskih družb brez samostojnih podjetnikov, razen v nekaj primerih, ki pa so v rezultatih posebej navedeni. Za različne kazalnike so bile uporabljene različne dolžine časovnih vrst (od 2 do 17 let). Izvedena je bila analiza naslednjih kazalnikov:

- Čisti prihodki od prodaje [€] (na domačem trgu in na tujem trgu) ter delež prodaje na tujih trgih [% glede na celotno prodajo].
- Odhodki [€], ki vključujejo stroške blaga, dela ter materiala in storitev.
- Neto čisti dobiček/izguba [€] pomeni razliko med čistimi prihodki in odhodki (Rebernik, 2008).
- Gospodarnost, ki predstavlja razmerje med vsemi prihodki in odhodki (Rebernik, 2008).
- Dodana vrednost, ki je izražena kot:
 - (1) dodana vrednost na zaposlenega [€], ki jo izračunamo tako, da od čistih prihodkov od prodaje odštejemo stroške blaga, materiala in storitev ter to delimo s številom zaposlenih,
 - (2) delež stroškov dela v dodani vrednosti [%], ki ga izračunamo tako, da stroške dela delimo z dodano vrednostjo (opredeljeno v prejšnji alineji).
- Produktivnost dela, ki je razmerje med indeksom industrijske proizvodnje (ki zajema rudarstvo (B), predelovalne dejavnosti (C) in oskrbo z elektriko in plinom (del D) in indeksom delovno aktivnega prebivalstva (Češek Vozel, 2017).
- Analiza blagovne menjave pa zajema pregled rasti izvoza in uvoza, pokritost uvoza z izvozom ter izračun deležev blagovne menjave po ekonomskih skupinah.

Za analizo časovnih vrst se najpogosteje uporabljajo indeksi, predvsem indeks s stalno osnovo in verižni indeks (Košmelj, 2001). Indeks s stalno osnovo je nova časovna vrsta, pri kateri vse podatke v osnovni časovni vrsti primerjamo z izbranim podatkom, osnovo (y_0), ki je stalna:

$$i_{t/0} = 100 \frac{Y_t}{Y_0} ; t = 1, 2, \dots, T$$

Osnova verižnega indeksa se spreminja, saj za primerjavo vzamemo predhodni podatek v časovni vrsti:

$$V_t = 100 \frac{Y_t}{Y_{t-1}} ; t = 1, 2, \dots, T$$

Izračunavali smo tudi indeksne točke [%], ki predstavljajo absolutno razliko v izračunanih indeksih.

V zaključku smo izdelali SWOT analizo, ki predstavlja strateško orodje, s katerim poskušamo ugotoviti prednosti in slabosti pa tudi priložnosti in glavne nevarnosti, s katerimi se bo predmet preučevanja (po navadi podjetje ali panoga) moral soočiti v prihodnosti (Pučko, 2002). Pri tem je potrebno upoštevati tako notranje kot zunanje dejavnike poslovanja (Seliškar, 2017).

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 REZULTATI KVALITATIVNE ANALIZE

3.1 RESULTS OF QUALITATIVE ANALYSIS

Ugotovimo lahko, da je bilo v letih po gospodarski krizi leta 2009 v lesni panogi doseženo veliko tako kvalitativnih kot kvantitativnih premikov na bolje. Že prej je bila leta 2005 ustanovljena Slovenska gozdno-lesna tehnološka platforma (SGLTP), ki je predstavljala nacionalno platformo kot sestavni del evropske iniciative (The Forest-based Sector Technology Platform - FTP) (Slovenska gozdno-lesna tehnološka platforma, 2017). Njen namen je bil skupaj z gospodarstva in znanstveno-raziskovalnimi inštitucijami izdelati dolgoročno razvojno strategijo gozdno lesne verige, kar je bilo predstavljeno v okviru Strateškega raziskovalnega programa (SRP) (Pohleven, 2010). Leta 2010 je bilo lesarstvo prvič vključeno med 8 perspektivnih panog v strateških dokumentih gospodarske politike Slovenije (Sklep 130. redne ..., 2007; Zapisnik 23. seje ..., 2010; Sprejeti sklepi ob ..., 2011). Rezultat tega so bili trije razvojni centri za lesarstvo (RC 31, IN-TECH-LES in RACE KOGO), katerih skupna vrednost je bila 25 mio € (Javni razpis za ..., 2010). Naslednji pomemben korak je bil storjen leta 2011 s formiranjem medresorske delovne skupine GOZD - LES s strani ministrov, pristojnih za gozdarstvo in gospodarstvo. To je bil prvi zametek sektorskega pristopa, saj so bili vključeni vsi ključni sektorski akterji, ki so pripravili akcijski načrt Les je lep (Akcijski načrt za ..., 2012). Ta

dokument velja za prvi lesarski dokument, ki ga je potrdila tudi Vlada RS, in sicer leta 2012, in zajema akcijski načrt za povečanje konkurenčnosti gozdno-lesne verige v Sloveniji do leta 2020. V tem času so bila oblikovana tudi izhodišča za prestrukturiranje slovenske lesnopredelovalne industrije, ki vključujejo številne smernice za izboljšanje stanja v panogi (Humar et al., 2012).

Povečanje interesa, tako politike kot javnosti, za okrepitev predelave lesa v Sloveniji je pripomoglo tudi k številnim drugim ukrepom. Na primer, subencioniranje izključno lesenega stavbnega pohištva s strani Eko sklada, sprejem uredbe o Zelenih javnih naročilih s 15 % obvezno rabo lesa pri izgradnji javnih stavb ter z vsaj 70 % deležem lesa pri pohištvu in podobno (Uredba o zelenem ..., 2017). Zelo pomembni pa sta bili tudi spremembi dveh uredb o sežiganju lesnih ostankov, za kar so bila potrebna več kot triletna pogajanja, saj sta bili v prejšnji verziji najostrejši v EU in je bilo uresničevanje njunih zahtev za predelovalce lesa izjemno drago (Uredba o emisiji ..., 2013; Uredba o sežigalnicah ..., 2016).

Zelo pomemben mejnik pri razvoju panoge je bil dosežen leta 2014, ko je Vlada Republike Slovenije uvrstila lesno panogo kot strateško prioriteto in s tem leta 2015 omogočila ustanovitev Direktorata za lesarstvo na Ministrstvu za gospodarski razvoj in tehnologijo. Direktorat za lesarstvo je poleg številnih ostalih nalog in pristojnosti omogočil tudi dodatne javne razpise, namenjene samo lesnopredelovalnim podjetjem, predvsem za razvoj novih izdelkov in storitev (Ministrstvo za gospodarski ..., 2017). Eden izmed takih je bil razpis za vzpostavitev Kompetenčnega centra za razvoj kadrov v lesarstvu (KOCles 2.0, 2017), katerega učinki na izboljšanje poslovanja bodo dolgoročni, saj vključuje polno financiranje izobraževanja za zaposlene v lesnih podjetjih (KOCles 2.0, 2017). Vladna podpora je bila odločilna tudi za oblikovanje ene izmed devetih domen za Strateško Razvojno Inovacijska Partnerstva (SRIP), tudi za lesarstvo, to je SRIP za Pametne stavbe in dom z lesno verigo (SRIP PsiDL) (Strateška razvojno-inovacijska ..., 2017).

Za lesarstvo je zelo pomembna tudi zamenjava modela gospodarjenja z gozdovi v lasti RS, ki jih od poletja 2016 dalje upravlja državno podjetje Slovenski državni gozdovi (Zakon o gospodarjenju ..., 2016). V tem poslovnem modelu mora biti omogočeno sklepanje tudi dolgoročnih pogodb o oskrbi z gozd-

nimi lesnimi sortimenti, kar je pogoj za okrepitev investicij v žagarstvo in primarno predelavo lesa (SiDG, 2017). To je še posebej pomembno, saj primarni del gozdno-lesne verige predstavlja največjo vrzel za povečanje predelave lesa iz slovenskih gozdov v Sloveniji, kar je, poleg doseganja trajne gospodarske uspešnosti panoge, drugi glavni cilj Združenja lesne in pohištvene industrije pri Gospodarski zbornici Slovenije (Gospodarska zbornica Slovenije, 2017).

3.2 REZULTATI KVANTITATIVNE ANALIZE

3.2 RESULTS OF QUANTITATIVE ANALYSIS

V letu 2016 je v lesni panogi (C16 in C31) delovalo 967 gospodarskih družb (brez samostojnih podjetnikov), v katerih je bilo 10.388 zaposlenih (9.811 v letu 2015). Delež lesnopredelovalnih gospodarskih družb (delujočih v C16 in C31) se je po številu v letu 2016 v primerjavi z letom 2015 povečal v strukturi predelovalnih dejavnost (C) za 1,47 %.

Prihodki vseh podjetij v panogi so leta 2016 znašali 1.181 mio € (1.065 mio € v 2015), odhodki pa 1.122 mio € (1.019 mio € v 2015), kar je generiralo 9,4 mio € čiste izgube in 71,3 mio € čistega dobička, oz. pozitiven rezultat iz poslovanja v višini 61,9 mio € neto čistega dobička/izgube.

Čisti prihodki od prodaje na domačem trgu so se v C16 glede na preteklo leto povečali za 6,8 % prav tako so se povečali v C31 za 13 %. Čisti prihodki od prodaje na tujem trgu so se v C16 povečali za

14,2 % glede na leto poprej, prav tako so se povečali v C31 za 7,6 %. V celoti so se čisti prihodki od prodaje v lesnopredelovalni panogi v 2016 v primerjavi z letom 2015 povečali za 10,9 %.

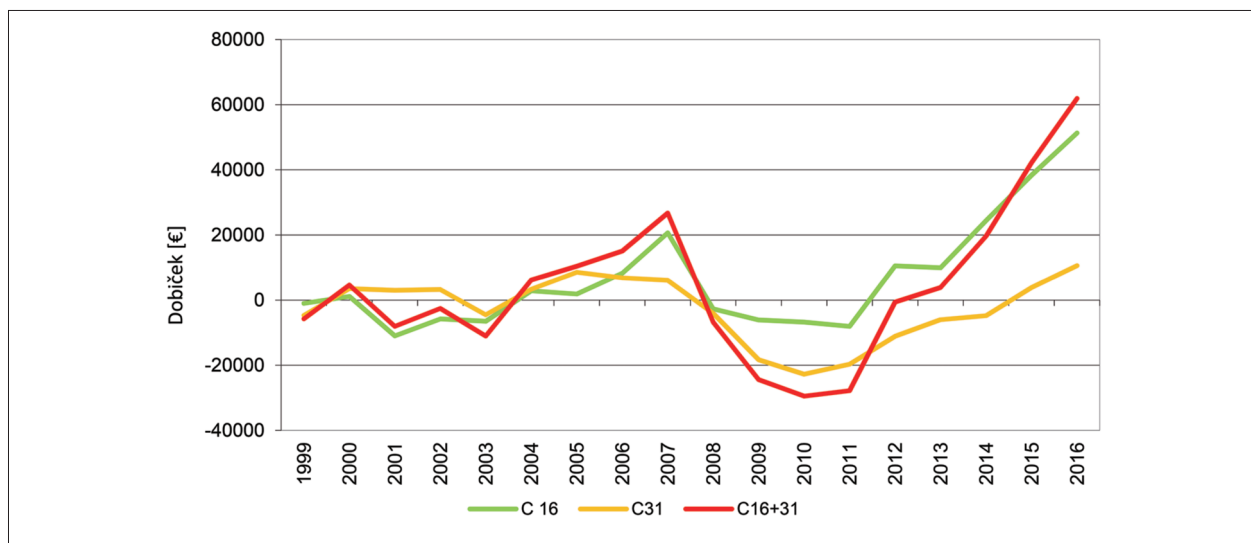
V panogi C16 so podjetja skupno zaključila poslovno leto 2016 z neto čistim dobičkom v višini 51,3 mio € (38,3 mio € v 2015), panoga C31 pa je poslovno leto 2016 zaključila z neto čistim dobičkom v višini 10,6 mio € (leta 2015 z 1,9 mio €).

V letu 2016 je največji neto čisti dobiček v lesnopredelovalni panogi zabeležilo podpodročje 16.230 (Stavbno mizarstvo in tesarstvo) v višini 16,4 mio €. V okviru panoge C31 pa je največji neto čisti dobiček doseglo podpodročje 31.090 (Proizvodnja drugega pohištva) in sicer v višini 6,6 mio €.

Gledano v celoti je v letu 2016 celotna lesna panoga (C16 in C31) že četrto leto zapored generirala čisti dobiček z indeksom rasti 1596 glede na leto 2012 in je močno presegla čisti dobiček v letih pred krizo (indeks rasti glede na leto 2007 znaša 231) (Slika 1).

Kazalnik gospodarnosti se je v C16 povečal in znaša 1,07 (1,06 leta 2015). V C31 se je prav tako povečal in znaša 1,04 (povečal se je za 3 indeksne točke glede na leto 2015).

Stroški blaga, materiala in storitev so se v C16 v letu 2016 glede na leto 2015 povečali za 10,4 %, v C31 pa za 9,2 %. Stroški blaga, materiala in storitev v strukturi odhodkov v C16 znašajo 76,41 %, v C31 pa 69,1 % (Preglednica 1). Stroški dela v C16 so se



Legenda: **C16** (Obdelava in predelava lesa) in **C31** (Proizvodnja pohištva)

Slika 1. Gibanje neto čistega dobička/izgube v lesnopredelovalni panogi

Figure 1. Fluctuation of net profit/loss in the wood industry sector

Preglednica 1. Stroški blaga, materiala in storitev, stroški dela in dodana vrednost v lesnopredelovalni panogi (v 1.000 €)

Table 1. Cost of goods, materials and services, cost of work and added value in wood industry sector (in 1.000 €)

Panoga	Stroški blaga, materiala in storitev		Stroški dela		Dodana vrednost	
	vrednost 2016 [1.000 €]	Indeks 16/15	vrednost 2016 [1.000 €]	Indeks 16/15	vrednost 2016 [1.000 €]	Indeks 16/15
C16	605.901	110,4	144.599	109,7	239	111
C31	213.540	109,2	77.304	110,1	106	115
C16 + C31	819.441	110,1	221.902	108,8	345.333	112,2

Legenda: **C16** (Obdelava in predelava lesa) in **C31** (Proizvodnja pohištva)

v letu 2016 glede na leto 2015 povečali za 9,7 %, število zaposlenih se je po delovnih urah povečalo za 7,1 %. V C31 so se prav tako povečali stroški dela za 10,1 %, število zaposlenih pa se je povečalo za 2,5 %. Za celotno lesnopredelovalno panogo so se stroški dela povečali za 10,1 %, prav tako pa se je obseg zaposlitve povečal za 5,4 %. Stroški dela v strukturi odhodkov sicer predstavljajo 19,9 %.

Dodana vrednost na zaposlenega (Preglednica 2) se je v C16 je v letu 2016 glede na leto 2015 povečala za 2,8 %, v C31 se je povečala za 15 %. Dodana vrednost na zaposlenega je v letu 2016 v C16 v povprečju znašala 36.073 € (34.804 € v letu 2015), kar pomeni, da se je povečala za 3,6 % glede na predhodno leto. V C31 pa je v letu 2016 znašala 28.673 € (25.514 € v letu 2015) in se je tako povečala za 12,2 %. To povečanje je posledica večje produktivnosti dela in proizvodnje izdelkov z višjo dodano vrednostjo (Kropivšek & Gornik Bučar, 2017). V lesnopredelovalni panogi kot celoti je dodana vrednost

na zaposlenega v letu 2016 znašala 33.403 € (31.375 € v letu 2015), kar pomeni slabih 78 % dodane vrednosti na zaposlenega v celotni panogi C, ki predstavlja povprečje vseh predelovalnih dejavnosti. Ugotovimo lahko, da se razlika do povprečja v celotni predelovalni panogi iz leta v leto zmanjšuje – leta 2015 je dodana vrednost na zaposlenega v lesarstvu znašala 75 % povprečja za celotno predelovalno dejavnost (panoga C), leta 2014 pa samo 70 %. Delež stroškov dela v dodani vrednosti za lesnopredelovalno panogo kot celoto je v 2016 znašal 64,3 % (66,3 % v letu 2015).

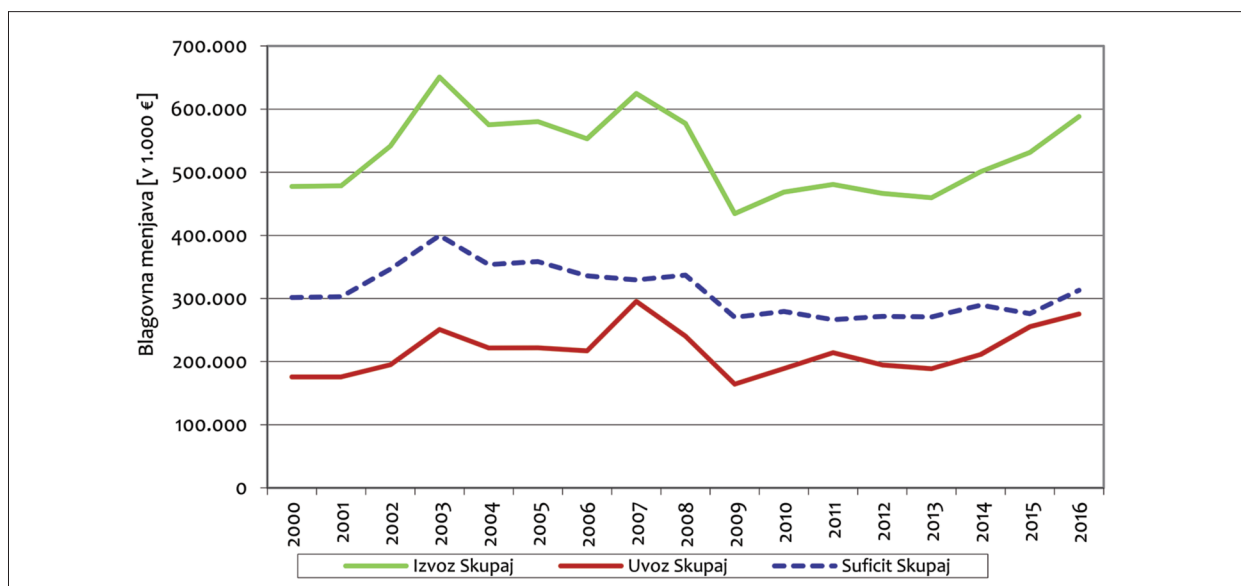
Produktivnost dela se zvišuje od leta 2009. V zadnjih dveh letih je trend zviševanja nekoliko bolj opazen. V letu 2016 je bila produktivnost dela za 3,6 % višja kot v letu 2015 in hkrati za 16,0 % višja od povprečja leta 2010. V letu 2016 je bila produktivnost dela v predelovalni dejavnosti za 4,7 % višja kot v letu 2015. V C16 se je produktivnost znižala za 0,23 indeksne točke, v C31 pa se je zvišala za 1,02 indeksne točke glede na leto 2015.

Delež prodaje na tujih trgih je zelo pomemben kazalec izvozne usmerjenosti. V celotnem gospodarstvu Slovenije so čisti prihodki od prodaje na tujih trgih v letu 2016 glede na leto 2015 narasli za 5,5 %. V predelovalni industriji C pa so v enakem obdobju čisti prihodki od prodaje na tujem trgu narasli za 5,1 % njihov delež v strukturi čistih prihodkov iz prodaje pa je znašal 70,2 %. V C16 Obdelavi in predelavi lesa so se čisti prihodki od prodaje na tujem trgu v letu 2016 povečali za 14,2 %, njihov delež v strukturi čistega prihodka iz prodaje pa znaša 58 %. V C31 so se čisti prihodki od prodaje na tujem trgu v letu 2016 glede na leto prej povečali za 7,6 %, njihov delež v strukturi čistega prihodka iz prodaje pa znaša

Preglednica 2. Dodana vrednost na zaposlenega

Table 2. Added value per employee

Oznaka panoge	Panoga	2014 [€]	2015 [€]	2016 [€]	Indeks 16/15
C16	Obdelava in predelava lesa	32.366	34.804	36.073	103,6
C31	Proizvodnja pohištva	23.139	25.514	28.637	112,2
C16+C31	Lesna panoga	28.919	31.375	33.403	106,5
C	Predelovalne dejavnosti	40.993	41.884	42.851	102,3
	Celotno gospodarstvo	40.324	41.124	42.094	102,4



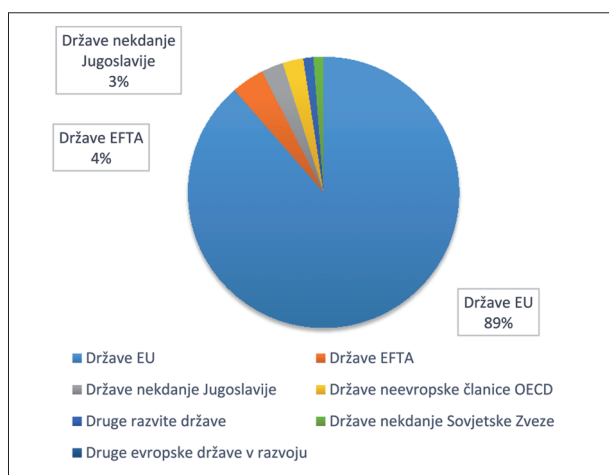
Slika 2. Blagovna menjava lesnopredelovalne dejavnosti

Figure 2. Goods exchange in the wood industry sector

44,6 %. V celoti so se čisti prihodki lesnopredelovalne panoge iz prodaje na tujem trgu povečali za 12,7 %, njihov delež v strukturi čistega prihodka iz prodaje pa je znašal 54,3 %. Največje povečanje obsega izvoza na tuje trge je bilo na področju 16.220 (Proizvodnja sestavljivega parketa), kjer je indeks prihodkov od izvoza znašal 310,9, na področju 16.100 (Žaganje, skobljanje in impregnacija lesa) pa je indeks znašal 162,1. V celoti je lesnopredelovalna panoga v letu 2016 izvozila za 627,1 mio €

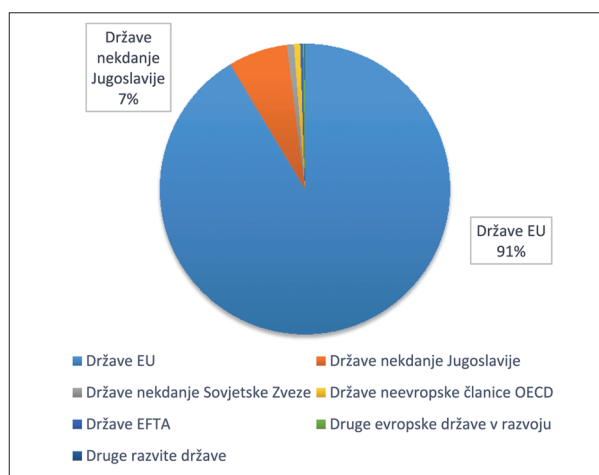
izdelkov in storitev. Delež izvoza v prihodkih od prodaje je bil najvišji v C16.290 (Proiz. drugih izd. iz lesa, plute, slame) in je znašal 85,4 % ter 68 % v C16.210 (Proizvodnja furnirja in plošč na osnovi lesa). V panogi C31 pa je imelo največji delež izvoza področje 31.010 (Proizvodnja drugega pohištva za poslovne in prodajne prostore) in sicer 56,9 %.

Blagovna menjava v zadnjih nekaj letih kaže trend naraščanja (Slika 2). V letu 2016 se je tako izvoz lesnopredelovalne panoge povečal za 10,7 %



Slika 3. Izvoz slovenske lesnopredelovalne panoge v 2016

Figure 3. Exports of the Slovenian wood industry sector in 2016



Slika 4. Uvoz slovenske lesnopredelovalne panoge v 2016

Figure 4. Imports of the Slovenian wood industry sector in 2016

Preglednica 3. Skupni prikaz ključnih podatkov o poslovanju gospodarskih družb in samostojnih podjetnikov, delujočih v dejavnostih C16 in C31 za 2016

Table 3. Summary of the key operational data of companies and sole proprietorship businesses operating in C16 and C31 sectors in 2016

Kazalnik / Leto	2013	2014	2015	2016
Povprečno število zaposlenih	11.589	11.342	11.499	12.053
Prihodki	1.088.427.782 €	1.136.883.029 €	1.244.662.507 €	1.365.108.160 €
Odhodki	1.072.388.589 €	1.107.463.522 €	1.190.046.185 €	1.288.180.226 €
Dodana vrednost	317.255.702 €	334.367.122 €	363.823.176 €	401.654.467 €
Dodana vrednost na zaposlenega	27.376 €	30.362 €	31.639 €	33.324 €

Legenda: **C16** (Obdelava in predelava lesa) in **C31** (Proizvodnja pohištva)

in uvoz za 7,8 %. Presežek (suficit) panoge v blagovni menjavi se je glede na prejšnje leto povečal za 13,3 % in je znašal 312 mio €.

Primerjava geografske razpršenosti izvoza in uvoza po ekonomskih skupinah držav (Slika 3 in 4) kaže podobo velike koncentracije izvoza in uvoza na države EU (izvoz 87 %, uvoz 88 % od celote), ter na tradicionalne trge držav nekdanje Jugoslavije (izvoz 3 %, uvoz 6 % od celote). Opaziti pa je, da se med destinacijami izvoza obeh lesarskih področij že več let stalno krepi predvsem delež blagovne menjave z državami EU in EFTA, medtem ko delež blagovne menjave z državami nekdanje Jugoslavije upada. Te strukturne premike pri destinacijah blagovne menjave nazorno prikaže podatek, da je leta 2009 znašal izvoz v EU 70 %, izvoz v države nekdanje Jugoslavije pa 18 % celotne blagovne menjave. Uvoz iz EU je takrat znašal 81 %, iz držav nekdanje Jugoslavije pa 15 %. Najbolj intenzivne destinacije izvoza in uvoza podjetij iz lesne panoge tudi v letu 2016 ostajajo Nemčija, Italija, Avstrija in Hrvaška.

Poleg gospodarskih družb sestavljajo pomemben del lesnopredelovalne panoge tudi samostojni podjetniki. Zato kumulativni podatki v Preglednici 3 predstavljajo celotno poslovanje panoge, v kateri je v letu 2016 delovalo 2.480 podjetij (gospodarske družbe in samostojni podjetniki).

Iz podatkov iz preglednice 3 je razvidno okrevanje panoge v zadnjih letih. Še posebej je pomembno, da število zaposlenih po več kot četrtsloletnem krčenju raste. Konstantno pa tudi kumulativno že štiri leta rastejo tudi prihodki, dodana vrednost, dodana vrednost na zaposlenega in dobiček.

Pri analizi razlik med samostojnimi podjetniki in gospodarskimi družbami lahko ugotovimo, da samo-

stojni podjetniki v povprečju zaposlujejo malo oseb (1.513 samostojnih podjetnikov je zaposlovalo 1.715 oseb). Skupaj so ustvarili 183.694.173 € prihodkov, kar predstavlja 13,5 % prihodkov celotne panoge. V dodani vrednosti na zaposlenega ni bistvene razlike, saj pri samostojnih podjetnikih ta v povprečju znaša 32.834 €, pri gospodarskih družbah pa 33.403 € (skupaj v povprečju 33.324 €). Največja razlika med obema skupinama je v deležu izvoza, saj je pri samostojnih podjetnikih le ta nizek in znaša 16,6 %, medtem ko pri gospodarskih družbah znaša 54,3 %.

Na osnovi vseh teh podatkov lahko s SWOT analizo lesne panoge v Sloveniji ugotovimo naslednje **prednosti**:

- status perspektivne panoge v strateških dokumentih gospodarske politike Republike Slovenije
- sektorski pristop v strateških usmeritvah panoge
- večanje dodane vrednosti na zaposlenega
- rast čistega dobička
- blagovna menjava raste z večjim deležem izvoza
- večanje deleža prodaje na tujih trgih
- velik strukturni premik pri destinacijah blagovne menjave
- rast prihodkov
- povečevanje števila zaposlenih
- izboljševanje produktivnosti dela

slabosti:

- slabo delovanje gozdno-lesne verige
- nizka dodana vrednost na zaposlenega v nekatereh delih panoge

priložnosti:

- vključenost v Strateško Razvojno Inovacijska Partnerstva (SRIP) za Pametne stavbe in dom z lesno verigo
- vzpostavitev Kompetenčnega centra za razvoj kadrov v lesarstvu (KOCles 2.0)
- državne uredbe, ki spodbujajo porabo lesa (npr. Uredba o zelenih javnih naročilih)
- priložnosti za krepitev blagovne menjave s tujino
- prehod v industrijo 4.0
- les ostaja ključen material nizkoogljične družbe
- dovolj kakovostnega lesa v slovenskih gozdovih
- povečan vpis v panožne izobraževalne programe

nevarnosti:

- velika delovna intenzivnost panoge
- proizvodnja izdelkov s (pre)nizko dodano vrednostjo

4 ZAKLJUČKI

4 CONCLUSIONS

Kvalitativna analiza lesne panoge v Sloveniji kaže na njen (zelo) ugoden položaj v gospodarstvu in v gospodarski politiki države ter (večjo) naklonjenost porabe in predelave lesa v Sloveniji. V teh razmerah je še posebej pomembno, da panoga to čim bolj izkoristi. Preko Direktorata za lesarstvo na Ministrstvu za gospodarstvo je nujno pripraviti realne in ambiciozne panožne gospodarske politike, s katerimi bo razvoj panoge omogočen še naprej. Povezovalne institucije (npr. Gospodarska zbornica Slovenije) pa morajo pri tem še naprej proaktivno sodelovati ter pomagati pri nadaljnji rasti internacionalizacije poslovanja. Rezultati kvantitativne analize lesne panoge v Sloveniji pa kažejo na izboljšanje ključnih finančnih kazalnikov v panogi. Panoga raste tako v prihodkih in številu zaposlenih kot tudi v dodani vrednosti na zaposlenega in produktivnosti dela. Povečuje se tudi blagovna menjava, ki izkazuje velik strukturni premik pri destinacijah, pomembno pa je predvsem, da se delež izvoza povečuje. Rast panoge pozitivno vpliva tudi na njeno podobo navzven, kar vpliva na razvojne in investicijske potencialne, zaposlovanje in vlaganja v raziskave, ter še močnejše povezovanje znotraj panoge in navzven. Podjetja morajo nadaljevati s posodabljanjem poslovnih procesov, uvajanjem najsodobnejših proizvodnih in informacijskih tehnologij v prehodu v indu-

strijo 4.0, razvijanjem kompetenc zaposlenih in seveda z inovativnostjo pri razvoju izdelkov in storitev, novih tržnih pristopih ter posodabljanjem njihovih poslovnih modelov.

Ob ugotovitvah, da se v zadnjih letih povečuje tudi vpis v panožne izobraževalne programe, da imamo dovolj kakovostnega lesa v slovenskih gozdovih in da les ostaja ključen material nizkoogljične družbe, lahko z gotovostjo zaključimo, da je krepitev lesne panoge v Sloveniji tudi v prihodnje zagotovljena.

5 POVZETEK

5 SUMMARY

The positioning of a sector inside the whole economy is of great importance for its further development. The sector, which plays a strategically important role within the economy, is subjected to numerous economic measures that influence its long-term development. The purpose of this article was to analyse the status (qualitative and quantitative) of the Slovenian wood industry with a detailed analysis of its business operations, and to evaluate its position in the economy and its development over the last few years. The wood industry sector includes two sectors – C16 (Manufacture of wood and of products of wood and cork, except furniture) and C31 (Manufacture of furniture).

Using publicly accessible documents, we estimated the qualitative situation of the wood industry in Slovenia. Quantitative analysis of the sector was performed by calculations of some financial indicators based on business (and financial) annual reports of related companies. Data were obtained from official sources, aggregated, and then processed in aggregated form. In most cases the financial data referred to all kinds of business enterprises (sole proprietorship businesses excluded), except in those cases which are specially marked in the results. We used different lengths of time series (from two to 17 years), and SWOT analysis was also performed.

The qualitative analysis of the wood industry sector in Slovenia shows its very favourable position in both the whole economy and in a political and economic context. It also shows growing consumption and processing of wood in Slovenia, and it is vital that the sector takes advantage of the currently favourable conditions. The Directorate of the Wood

Industry of the Ministry of Economic Development and Technology should thus prepare realistic and ambitious sectorial politics for its further development. Related institutions (i.e. the Chamber of Commerce and Industry of Slovenia) should cooperate proactively and help to achieve further internationalisation of this sector. The results of the quantitative analysis of the wood industry in Slovenia show significant improvements in some key financial indicators, with industry turnover and number of employees both increasing, as well as the added value per employee and productivity of work. Trade has also increased, with a significant structural shift in the destinations of exports, and a growth in the amount of such sales. The growth of the sector has positive effects on public perceptions of it, which then influences its development and investment potential, as well as employment and research opportunities. Such developments also help companies with networking inside as well as outside of the sector. Companies working in the sector should proceed with modernising their business processes, and introducing the latest production and information technologies with the transition to an Industry 4.0 model. They should also develop and/or improve the competences of their employees, work on the innovative development of products/services and new marketing strategies, and overall modernise their business models.

Increased enrolment into educational programmes connected to the wood industry sector in the last few years, along with the availability of high quality wood in Slovenian forests, which can provide key materials to achieve a low carbon society, lead to the conclusion that strength of the wood industry sector in Slovenia and its further development are guaranteed in the near future.

VIRI

REFERENCES

- Ajpes (2017). Informacija o poslovanju gospodarskih družb v republiki Sloveniji v letih od 2007 do 2016. Retrived from: <https://www.ajpes.si/jolp/>.
- Akcijski načrt za povečanje konkurenčnosti gozdno-lesne verige v Sloveniji do leta 2020 – »Les je lep« (2012). Retrieved from: http://www.mkgp.gov.si/si/delovna_podrocja/gozdarstvo/akcijski_nacrt_zpovecanje_konkurencnosti_gozdno_lesne_verige_do_2020/ (10.10.2017).
- Braunsberger, F., Hlavaty, M., Schlamberger, N., & Stevanovič, S. (2010). Standardna klasifikacija dejavnosti 2008. Statistični urad Republike Slovenije, Ljubljana.
- Češek Vozel, N. (2017). Metodološko pojasnilo: indeksi industrijske proizvodnje, prihodka od prodaje, zalog in produktivnosti dela v industriji. Retrieved from: <http://www.stat.si/StatWeb/File/DocSysFile/8183/17-011-MP.pdf> (15.11.2017).
- Gospodarska zbornica Slovenije, Združenje lesne in pohištvene industrije (2017). Retrieved from: https://www.gzs.si/zdruzenje_lesne_in_pohistvene_industrije (15.10.2017).
- Humar, M., Krajnc, N., Kropivšek, J., Kutnar, A., Likar, B., Piškur, M., Milavec, I., & Tavzes, Č. (2012). Izhodišča za prestrukturiranje slovenske lesnopredelovalne industrije. Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Ljubljana.
- Javni razpis za pridobitev sredstev Evropskega sklada za regionalni razvoj - »Razvojni centri slovenskega gospodarstva« (2010). Retrieved from: http://www.mgrt.gov.si/si/delovna_podrocja/tehnoloski_razvoj/razvojni_centri_slovenskega_gospodarstva/ (15.11.2017).
- Kazalniki poslovanja GZS - KAPOŠ GZS (2017). Retrieved from: <https://www.gzs.si/Default.aspx?tabid=34170> (15.11.2017).
- KOCles 2.0 (2017). Retrieved from: <https://www.kocles.si/> (21.11.2017).
- Košmelj, K. (2001). Uporabna statistika. Biotehniška fakulteta, Ljubljana.
- Kropivšek, J., & Gornik Bučar, D. (2017). Dodana vrednost v izdelkih v gozdno-lesni verigi - Primer: primarna predelava bukovine. Les/Wood, 66 (1), 61–72. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2017.v66n01a06>.
- Likar, B., & Valentinčič, E. (2017). Informacija o poslovanju lesne in pohištvene industrije v letu 2016. GZS, Ljubljana.
- Ministrstvo za gospodarski razvoj in tehnologijo (Republika Slovenija), Direktorat za lesarstvo (2017). Retrieved from: http://www.mgrt.gov.si/si/delovna_podrocja/lesarstvo/ (15.11.2017).
- Pohleven, F. (2010). Pomen SGLTP za povezavo gozdarstva, predelave in energetske izrabe lesa ter oblikovanja z industrijo. In: Pohleven, F. (ed.): Gozd in les – razvojna priložnost Slovenije. Zbornik referatov in razprav, št. 5/2010. Republika Slovenija, Državni svet. Retrieved from: http://www.ds-rs.si/sites/default/files/dokumenti/zbornik_gozd_in_les_razvojna_priloznost_slovenije.pdf (15.11.2017).
- Pučko, D. (2002). Strateško planiranje. In: S. Možina (ed.): Management (pp. 270–313). Didakta, Radovljica.
- Rebernik, M. (2008). Ekonomika podjetja. Gospodarski vestnik, Ljubljana.
- Samuelson, P. A., & Nordhaus, W.D. (2002). Ekonomija. GV založba, Ljubljana; Mate, Posušje.
- Seliškar, V. (2017). Poslovna analiza, analitika in inteligenca – jih res ločimo? Monitor Pro (2017). Retrieved from: <http://www.monitor.si/clanek/poslovna-analiza-analitika-in-inteligenca-jih-res-ločimo/178038/> (1.10.2017).
- SiDG, Poslanstvo družbe (2017). Retrieved from: <http://www.sidg.si/index.php/o-sidg/poslanstvo> (15.10.2017).

- Sklep 130. redne seje, št. 34000-2/2007/5 z dne 12.7.2007 (2007). Retrieved from: http://www.mkgp.gov.si/fileadmin/mkgp.gov.si/pageuploads/svo/49seja_Sklep_vlade_RS.pdf (15.11.2017).
- Slovenska gozdno-lesna tehnološka platforma (2017). Retrieved from: https://www.gzs.si/zdruzenje_lesne_in_pohistvene_industrije/vsebinav2/Raziskovalna-dejavnost-projekti/Slovenska-gozdno-lesna-tehnolo%C5%A1ka-platforma-SGLTP (15.11.2017)
- Sprejeti sklepi ob obravnavi osnutka Programa trajnostnega razvoja vrednotenja verige lesa. Skupna seja, št. 323-01/11-2/4 z dne 11.3.2011 (2011). Retrieved from: <http://www.lesena-gradnja.si/html/img/pool/scan0114.pdf> (15.11.2017).
- Strategija trajnostne rasti slovenskega turizma 2017–2021 z dne 5.10.2017 (2017). Retrieved from: http://www.mgrt.gov.si/fileadmin/mgrt.gov.si/pageuploads/Strategija_turizem_koncno_5.10.2017.pdf (15.11.2017).
- Strateška razvojno-inovacijska partnerstva (2017). Retrieved from: http://www.svrk.gov.si/si/delovna_podrocja/strategija_pametne_spezializacije/strateska_razvojno_inovacijska_partnerstva_srip/ (15.10.2017).
- Uredba o emisiji snovi v zrak iz malih in srednjih kurilnih naprav, št. 00728-8/2013, Uradni list RS, št. 24/2013 z dne 20.3.2013 (2013). Retrieved from: <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2013-01-0862?sop=2013-01-0862> (15.11.2017).
- Uredba o sežigalnicah odpadkov in napravah za sosežig odpadkov, št. 00719-3/2016, Uradni list RS, št. 8/2016 z dne 5.2.2016 (2016). Retrieved from: <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2016-01-0285?sop=2016-01-0285> (15.11.2017).
- Uredba o zelenem javnem naročanju, št. 00714-24/2016, Uradni list RS, št. 51/2017 z dne 19.9.2017 (2017). Retrieved from: <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2017-01-2381/uredba-o-zelenem-javnem-narocanju> (15.11.2017).
- Zakon o gospodarjenju z gozdovi v lasti Republike Slovenije (ZGGLRS), št. 323-01/15-14/59. Uradni list RS, št. 9/2016 z dne 12.2.2016 (2016). Retrieved from: <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2016-01-0340?sop=2016-01-0340> (15.11.2017).
- Zapisnik 23. seje Odbora za gospodarstvo, št. 060-16 / 10 – 0023 z dne 11.5.2010 (2010). Retrieved from: http://www2.gov.si/zak/Sej_dt.nsf/56dfa27c1539fda4c12563950042c89c/42143aa5b22e7ab6c125771a00314b85?OpenDocument (15.11.2017).

SESTAVA, LASTNOSTI, UPORABA IN RECIKLAŽA KERROCKA

COMPOSITION, PROPERTIES AND APPLICATION OF KERROCK

Matej Vovk¹, Andrej Beličič², Milan Šernek^{3*}

UDK 678.86

Izvleček / Abstract

Pregledni znanstveni članek / Review scientific article

Izvleček: Kerrock je trd kompozitni material, sestavljen iz 40 ut. % polimetil metakrilata (PMMA) in 60 ut. % aluminijevega hidroksida (ATH), vezni člen med njima pa je silan. V tuji strokovni literaturi podobne materiale poimenujejo kot PMMA/ATH kompozit, Kerrock pa je eno od komercialnih imen za ta material. Lastnosti PMMA so odvisne od stopnje in načina polimerizacije, na splošno pa velja, da je trd, vodoodporen in UV odporen ter se ga lahko obdeluje. ATH je bel, netoksičen material, relativno mehak in neabraziven ter eden izmed najbolj razširjenih samougasljivih dodatkov v polimernih kompozitih. Zaradi takšne sestave je Kerrock možno obdelovati kot les in ga termoformirati kot plastomerne materiale. Uporablja se za opremo notranjih prostorov in v gradbeništvu kot fasadni element. Na mehanske lastnosti vplivajo morfologija stičnih površin polnila, adhezija na stični površini med polnilom in polimerno matrico, porazdelitev delcev ATH in vsebnost silana oziroma drugih dodatkov. Kerrock je možno kemično reciklirati, vendar takšni postopki zahtevajo velik energijski vložek. Druga možnost recikliranja je povezovanje prašnih delcev Kerrocka z vročim stiskanjem in tudi možnim predhodnim dodajanjem MMA ali poliestrske smole. V zadnjih letih so se raziskave in razvoj reciklaže odpadnih produktov Kerrocka preusmerile v povezovanje le-teh z lesom, kar je privedlo do novih rešitev. Recikliranju tega kompozita bo v prihodnje potrebno posvetiti več pozornosti.

Ključne besede: Kerrock, kompozit, ATH, PMMA, PMMA/ATH, silan, reciklaža

Abstract: Kerrock is a solid surface composite material, which is composed of 40 wt.% of polymethylmethacrylate (PMMA) and 60 wt.% of aluminium trihydroxide (ATH) filler with silane as a coupling agent. Similar material is also called PMMA/ATH composite in the academic literature, while Kerrock is one of its commercial names. PMMA is a hard material that is water- and UV-resistant and easy to work with, although its characteristics depend on the degree and process of polymerization that occurs. ATH is a white, nontoxic material that is relatively soft and non-abrasive. It is widely used as an effective fire-retardant filler in polymer composites. Because of its composition, the machining of Kerrock is similar to the machining of wood. Moreover, it can also be thermoformed, like thermoplastics. Kerrock is widely used for work surfaces and cladding, with both indoor and outdoor applications. The material's interfacial morphology, interfacial adhesion between the filler and polymer matrix, dispersion of ATH particles and concentration of adhesion promoting agent have the biggest impacts on the mechanical characteristics of Kerrock. While it is possible to chemically recycle Kerrock, the energy required for this is too high for this process to be practical. Another option for recycling this composite is to combine its particles in a hot press or to add MMA or polyester resin before pressing. However, there remains much work to be done with regard to effectively recycling Kerrock.

Keywords: Kerrock, composite, ATH, PMMA, PMMA/ATH, silane, recycling

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Kerrock je tržno ime za trd kompozitni material (»Solid surface material«, ISO 19712:2007), ki ga proizvaja Kolpa, d.d. iz Metlike (Slovenija). Uvrščamo

ga lahko med hibridne, organsko-anorganske materiale, saj vsebuje 40 ut. % polimetil metakrilata (PMMA, organska komponenta) in 60 ut. % aluminijevega hidroksida (ATH, anorganska komponenta) ter dodatke za doseganje posebnih lastnosti. Med organsko in anorgansko komponento je vzpostavljena kemijska vez preko silana z metakrilno funkcionalno skupino. Osnove za izdelavo tovrstnega materiala opisujejo že Duggins in sodelavci (1974a; 1974b). Kerrock proizvajajo v obliki kompozitnih plošč (KP) različnih dimenzij, barv in struktur, ki jih

¹ Slovenska vas 30, 8261 Jesenice na Dolenjskem, Slovenija

² Kolpa d.d., Rosalnice 5, 8330 Metlika, Slovenija

³ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenija

* e-pošta: milan.sernek@bf.uni-lj.si

je možno uporabljati za opremljanje notranjih prostorov ter kot fasadne elemente. Takšen material je možno kombinirati s številnimi drugimi, tudi z lesom. V članku predstavljamo lastnosti posameznih sestavin Kerrocka, njihovo medsebojno interakcijo ter kemijske osnove izdelave Kerrocka. Dodani so opisi lastnosti in uporabe tega kompozitnega materiala, možnosti recikliranja in ponovne uporabe stranskih in odpadnih produktov ter opisi združljivosti Kerrocka z lesom.

2 POLIMETIL METAKRILAT (PMMA)

2 POLYMETHYLMETHACRYLATE (PMMA)

Makromolekulo PMMA so prvič sintetizirali leta 1931 (Fahlman, 2007), uvrščamo jo v skupino poliacetijskih smol in temelji na monomeru metilmetakrilatu (MMA). Slednji ustreza molekuli etilena z metilno skupino (CH_3 -) namesto enega vodikovega atoma, medtem ko drugi vodikov atom na istem ogljiku nadomešča acetilna skupina (CH_3COO -). Tako dobimo osnovno enoto monomera: $[-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)(\text{COOCH}_3)-]_n$. Surovina za sintezo PMMA je 2-hidroksi-2-metilpropanitril, ki nastane z reakcijo med acetonom in vodikovim cianidom (Enačba ... (1) (Cardarelli, 2008).



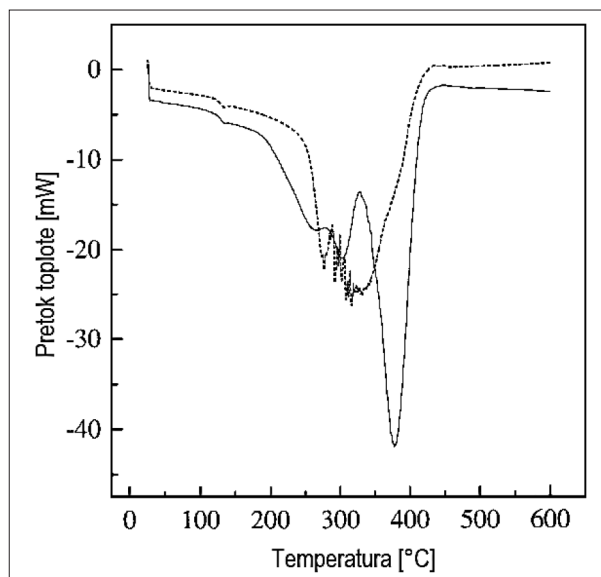
Pozneje 2-hidroksi-2-metilpropanenitril reagira z metanolom (CH_3OH), s katerim tvori metakrilatni ester. Sledi izjemno eksotermna radikalska polimerizacija, ki jo spodbudijo organski peroksidi (Deanin & Mead, 2007) ali azo iniciatorji, končni produkt pa je makromolekula PMMA (Cardarelli, 2008). Polimerizacija nastopi v treh korakih: iniciacija (ali aktivacija), propagacija verige in terminacija (zaključevanje - oblikovanje končne makromolekule).

PMMA je prozoren in tog ter trden plastomer, dobro odporen na atmosferske vplive in UV sevanje (Deanin & Mead, 2007). Zgornja temperatura, pri kateri je PMMA uporaben za obdelavo, je 90°C , temperatura steklastega prehoda (T_g) pa približno 105°C (Navodnik & Kopčič, 1998; Cardarelli, 2008). PMMA je dobro obstojen v alifatskih ogljikovodikih, nepolarnih topilih, vodnih raztopinah kislin in baz, maščobah in alkoholih (do 30 %). Neobstojen je v polarnih topilih (klorirani ogljikovodiki), alkoholih (nad 30 %), benzol vsebujočem bencinu, špiritu, ni-

trolakih in nitrorazredčilih, koncentriranih kislinah in določenih mehčalih. Gori s svetlečim in prasketajočim plamenom, pri tem pa ne kaplja in gori praktično brez ostankov. PMMA je fiziološko nenevaren, oziroma nestrupen. Možno ga je brizgati, ekstrudirati, termoformirati (Jagger & Okdeh, 1995), lepiti, variti, brusiti in vrtati (Navodnik & Kopčič, 1998).

Površina trdnega PMMA je monopolarna, oziroma izraža le elektron-donorske interakcije (γ^-), medtem ko elektron-akceptorskega parametra ni moč zaznati (Chibowski et al., 2002; Radelczuk et al., 2002). Vrednost proste površinske energije PMMA je med $40,6$ in $41,9 \text{ mJ/m}^2$ (Radelczuk et al., 2002), obstajajo pa razlike pri izmerjeni prosti površinski energiji v odvisnosti od vlažnosti okolja (Holysz et al., 2008).

Glede odpora na ogenj in visoke temperature je potrebno poudariti, da se zamrežen PMMA ne topi, modul elastičnosti (E') pa ne pade značilno,



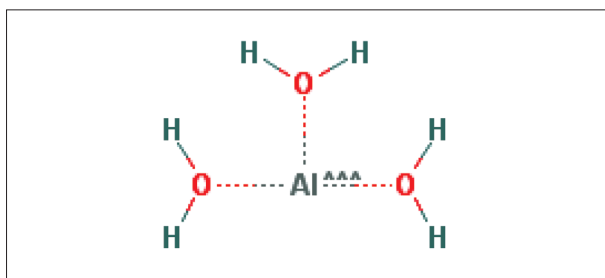
Slika 1. Graf analize razpada PMMA (polimetil metakrilat) z diferenčno dinamično kalorimetrijo (DSC) ob prisotnosti zraka (prekinjena črta) in dušika (polna črta). Masa PMMA je znašala 15,5 oziroma 9,8 mg, stopnja segrevanja pa $20^\circ\text{C min}^{-1}$ (Peterson et al., 1999)

Figure 1. Overlay of differential dynamic calorimetry (DSC) scans collected under air (dashed line) and nitrogen (solid line). The masses of PMMA (polymethylmethacrylate) samples are 9,8 and 15,5 mg for scans under N_2 and air, respectively. The heating rate is $20^\circ\text{C min}^{-1}$ (Peterson et al., 1999)

dokler se ne pojavi termični razpad (Forrest, 2002). Slednji je odvisen od stopnje polimerizacije polimera, prisotnosti oziroma koncentracije kisika in dušika v eksperimentalnem okolju (Slika 1), velikosti vzorcev ter tudi od načina polimerizacije. Tako je na primer PMMA, ki je polimeriziran z iniciatorjem benzoil peroksidom, manj stabilen od termično polimeriziranega PMMA brez prisotnosti iniciatorjev (Pielichowski & Njuguna, 2005). Termični razpad PMMA je seveda odvisen tudi od eksperimentalnih pogojev, zato se ugotovitve raziskovalcev v literaturi tudi razlikujejo (Kashiwagi et al., 1986; Peterson et al., 1999; Forrest, 2002; Ferriol et al., 2003; Pielichowski & Njuguna, 2005).

V gradbeništvu se PMMA uporablja za zasteklitve streh, pregradne stene za rastlinjake in zimske vrtove, sanitarne instalacije, kopalne kadi, tuš kadi, bazene, kabine za tuširanje, sanitarne celice, prozorne cevovode itd. Možno ga je uporabiti v optiki, pri izdelavi gospodinjskih aparatov, v elektrotehniki, avtomobilski in letalski industriji, v pisarniški opreми, reklamnih panojih in razni signalizacijski opreми ter v medicini (Navodnik & Kopčič, 1998).

3 ALUMINIJEV HIDROKSID (ATH) 3 ALUMINUM TRIHYDROXIDE (ATH)



Slika 2. Strukturna formula ATH.

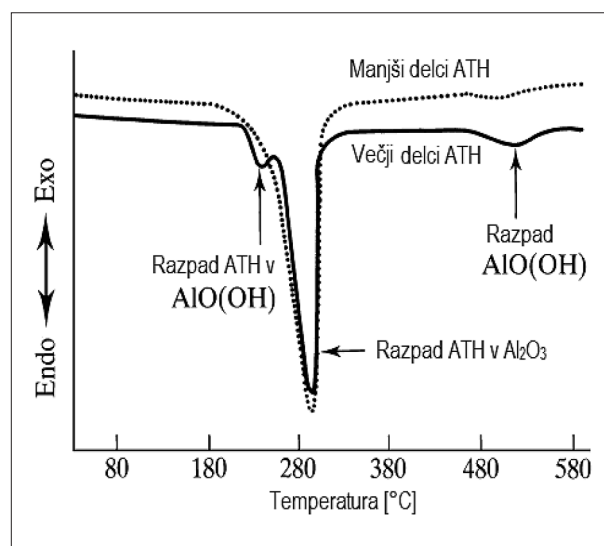
Figure 2. Structure formula of ATH.

ATH ($\text{Al}(\text{OH})_3$) je krhek, bel, netoksičen material, topen v močnih kislinah in bazah, relativno mehek (trdnost po Mohsu je približno 3) in neabraziven. Je aktivni antipiretik in eden izmed najbolj razširjenih samougasljivih (protivžignih) dodatkov oz. polnil polimerov in polimernih kompozitov. Obstaja več kristalnih oblik aluminijevega hidroksida, a le gibsit se uporablja kot protivžigni dodatek (Rothon, 2003). Priljubljen je zaradi nizke cene, dobre sposobnosti dušenja ognja in netoksičnega dima (Mouritz & Gib-

son, 2006), dostopnosti v širokem spektru velikosti in oblik ter možnosti površinske obdelave. Pogosto je potrebno dodati 50 % ali več polnila, ki naj bi bilo enakomerno razporejeno v polimerni matrici, da bi zagotovili dober odpor proti ognju (Rothon, 2003; Mouritz & Gibson, 2006). Pri gorenju je ATH aktiven tako v trdnem kot prašnatem stanju, zato je izjemno učinkovit pri dušenju ognja in dima. Glavni mehanizem v trdnem stanju pri dušenju ognja je absorpcija toplote (Mouritz & Gibson, 2006). Začetek termičnega razpada ATH je med 180 in 200 °C (Camino et al., 2001; Laoutid et al., 2009; Hull et al., 2011), ko se začne sproščati voda in nastajati aluminijev oksid (Enačba ... (2)), nadaljnji razpad pa poteka med 220 in 440 °C (Camino et al., 2001; Mouritz & Gibson, 2006). Pri popolnem razpadu izgubi 34,6 % vode (Rothon, 2003), temperatura rekristalizacije pa je 2000 °C (Basaran et al., 2008).



Reakcija razpada se pojavi v dveh stopnjah, ki sta odziv endotermnih tranzicij. Vmesni produkt, znan kot boehmit (AlOOH), ima veliko manjšo endotermno energijo. Sicer pa to tranzicijo bolje zaznamo pri večji velikosti delcev ATH (Rothon, 2003; Laoutid et al., 2009), kar je razvidno na sliki (Slika 3). ATH je zelo



Slika 3. Vpliv velikosti delcev ATH (aluminijevega hidroksida) na njegov razpad (Rothon, 2003)

Figure 3. The effect of particle size on the decomposition pathway of ATH (aluminium trihydroxide) (Rothon, 2003)

učinkovit pri zmanjševanju stopnje sproščanja toplote, zaradi česar upočasnjuje pirolizo. Njegova prisotnost v kompozitih zmanjša oddano toploto za 15 do 40 %, odvisno od dovajane energije (Kaminsky et al., 2004). Pri endotermnem razpadu polnilo v polimerni matrici absorbira nekaj več kot polovico energije, ki se sprošča pri gorenju, vendar pa obstaja razlika med absorpcijo energije pri trdni in plinasti fazi mineralnih polnil (Hull et al., 2011).

Reakcija razpada ATH ima več različnih vplivov na gorenje polimera v katerem se nahaja (Mouritz & Gibson, 2006):

- absorbira 1050 kJ/kg ATH, zaradi česar se polimer ohlaja,
- nastali Al_2O_3 pri razpadu ATH oblikuje toplotno izolacijo polimera,
- sproščena vodna para redči koncentracijo vnetljivih plinov in oblikuje nastanek plinske zaščitne plasti.

ATH je učinkovit protivžigni dodatek za različne polimere: poliester, epoksi smole, etilen-propilendien-terpolimer (EPDM) (Mouritz & Gibson, 2006; Balachandran et al., 2012; Shi et al., 2012). Vendar pa z dodajanjem ATH ne dosežemo nujno enake stopnje odpora proti ognju, ki ga izkazujejo že po naravi odporni polimeri, kot so fenolne smole (Mouritz & Gibson, 2006). Uporaba ATH kot polnila in zaviralca ognja je možna tudi v tako imenovanih lesno-plastičnih kompozitih (WPC) (Garcia et al., 2009).

Tudi v Kerrocku ima ATH nalogo polnila in protivžignega dodatka (izboljša toplotno stabilnost in prevodnost), hkrati pa zmanjša porabo polimera PMMA ter izboljša dielektrične lastnosti (Duggins, 1974b). Običajno velja, da imajo polnila v obliki drobnih delcev (prahu, kristalov) pomembno vlogo pri mehanskih lastnostih kompozita, saj izboljšajo tlačno in strižno trdnost kompozitov, zmanjšajo pa natezno trdnost in povečajo utrudljivost materiala. Poleg velikosti delcev, oblike, dimenzijskega razmerja, porazdelitve v polimerni matrici in elastičnega modula vseh sestavin lahko na obnašanje sistema (kompozita) s praškastimi polnili vplivajo tudi: moč adhezivne vezi med polimerno matrico in polnilom ter porazdelitev in aglomeracija delcev. Na splošno velja, da se zaradi polnila voljnost matrice zmanjša in postane bolj krhka ter odvisna od velikosti delcev (Basaran et al., 2008).

Pri uporabi aluminijevega hidroksida kot polnila je potrebno zagotoviti njegovo kompatibilnost s po-

limerom. Rešitev je v uporabi organo-silanov, na katere se ATH dobro odziva in so dober izbor za modifikacijo njegove polarne površine (Rothon, 2003). Prosta površinska energija ATH znaša $215,22 \text{ mJ/m}^2$, od tega znaša disperzni del $42,59 \text{ mJ/m}^2$, polarni pa $172,63 \text{ mJ/m}^2$ (Bunker et al., 2008). Bunker in sodelavci (2008) so izračunali delo adhezije v sistemu PMMA+ATH, ki je znašalo 140 mJ/m^2 , vendar pa je pri tem potrebno poudariti, da niso uporabili oprijemalnega sredstva, čigar vlogo opisujemo v naslednjem poglavju.

4 SILAN

4 SILANE

Silani z nizko molekulsko maso, ki vsebujejo organske funkcionalne skupine z afiniteto za določen polimer, so oprijemalna sredstva, ki se jih uporablja za ojačanje plastomerov in duromerov s steklenimi vlakni ali drugimi mineralnimi polnili (Saechtling, 1995). Uporabo silanov pri izdelavi Kerrocku podobnih kompozitnih plošč opisuje že Osborn s sodelavci (1981). V kompozitnih ploščah Kerrock je silan vezni člen med ATH in PMMA. Pri tem je potrebno zagotoviti, da se organska funkcionalna skupina silana ujema z matrico polimera, saj le tako lahko vzpostavimo kemijsko vez med tema dvema elementoma (Rothon, 2003). Hidrolizirana silanol skupina reagira s hidroksilnimi skupinami na površini anorganske komponente in tako nastanejo vodikove vezi. Sledi kondenzacija, pri kateri se tvorijo oksanske vezi. Nastanek oksanskih in vodikovih vezi je reverzibilna reakcija (Walker, 2003).

Substrat ima lahko na molekularno strukturo deponiranega silana (MEMO) ključen vpliv. Plasti deponiranih molekul silana so lahko kemijsko ali fizikalno vezane (angl. »chemisorbed and physisorbed«) na površini mineralnih substratov. Količina kemijsko in fizikalno vezanih molekul je odvisna od: (i) kemijske funkcionalnosti površine substrata, (ii) količine deponiranega silana in (iii) pH okolja, ki je odvisen od kislo/bazičnih lastnosti substrata. Stopnja kemisorpcije je pri silanu MEMO najvišja na nevtralnih substratih, pri kislih ali bazičnih substratih pa je bolj odvisna od kemijske funkcionalnosti površine.

Komercialno dostopni silani imajo običajno alkoksi osnovo in vsebujejo le eno organsko skupino (OR), ki je vezana na silicij: $\text{R} - \text{Si} - (\text{OR})_3$. R predstavlja hidrolizirajočo skupino, ki reagira s hidroksilnimi

skupinami na površini polnila. Skupina OR je povezana preko hidrolitično stabilne vezi med silicijem in ogljikom. Lahko je inertna ali pa vsebuje reaktivne funkcionalne organske skupine, kot so vinilna, amino, akrilna in tako naprej (Rothon, 2003).

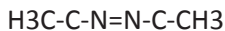
Silani so lahko učinkoviti tako, da jih predhodno nanesemo na substrat, ali pa jih dodajamo kot aditive raznim premazom. Dobra lastnost silanov je, da preprečujejo aglomeracijo delcev, izboljšajo omočenje, povečajo hidrofobnost, izboljšajo korozijsko odpornost, električno prevodnost v prevodnih sistemih in odpornost na kisline, z medsebojno povezavo pa tvorijo kompleksne tridimenzionalne mreže (Rothon, 2003; Walker, 2003). Pri uporabi silanov v sistemih s polnili se lahko spremeni tudi reologija. Silani (predvsem amino-silani) lahko delujejo kot utrjevalci ali pospeševalci utrjevanja v epoksidnih in uretanskih lepilih, s tem pa tudi zmanjšajo uporabni čas mešanice (Walker, 2003).

5 KEMIJSKE OSNOVE SINTEZE KERROCKA

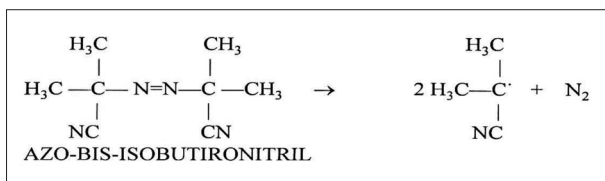
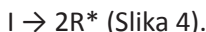
5 CHEMICAL BASIS OF KERROCK SYNTHESIS

Glavni mehanizem pri sintezi Kerrocka je radikalna polimerizacija MMA v PMMA. Polimerizacija s prostimi radikali vključuje nestabilne kemijske vrste (R – prosti radikali) s prostimi elektroni. Prosti radikali lahko nastanejo s kemijsko reakcijo, npr. z razpadom organskih peroksidov, kot je benzoil-peroksid (Cardarelli, 2008). Radikalna polimerizacija PMMA pri proizvodnji Kerrocka sledi trem korakom:

1. Faza iniciacije



Molekula iniciatorja razpade v radikalsko obliko:

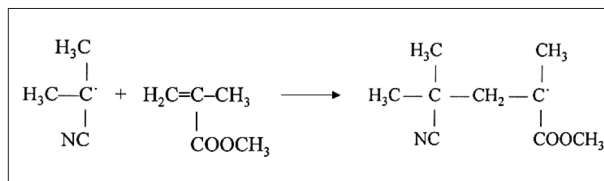


Slika 4. Faza iniciacije: molekula iniciatorja azo-bis-isobutironitril razpade v radikalsko obliko

Figure 4. Initiation phase: disintegration of initiator molecule azo-bis-isobutironitrile

2. Faza propagacije (rast verig)

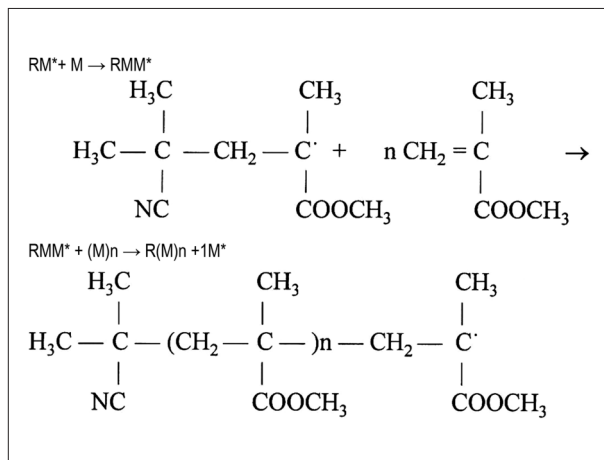
Radikali iniciatorja aktivirajo molekulo monomera v radikalsko obliko: $\text{R}^* + \text{M} \rightarrow \text{RM}^*$ (Slika 5).



Slika 5: Faza propagacije: radikali iniciatorja aktivirajo molekulo monomera v radikalsko obliko

Figure 5: Propagation phase: initiator radicals activating the monomer molecule into the radical form

Po aktivaciji se s hitro verižno reakcijo veliko število ostalih monomernih enot »pripne« na aktivne molekule (adicija), kar sproži rast verig (Slika 6).



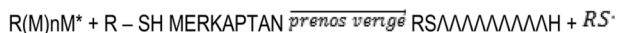
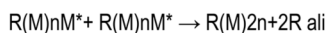
Slika 6. Adicija monomernih enot na aktivne molekule

Figure 6. Addition of monomer units on active molecules

3. Faza terminacije

(prekinitev oz. zaključek reakcije)

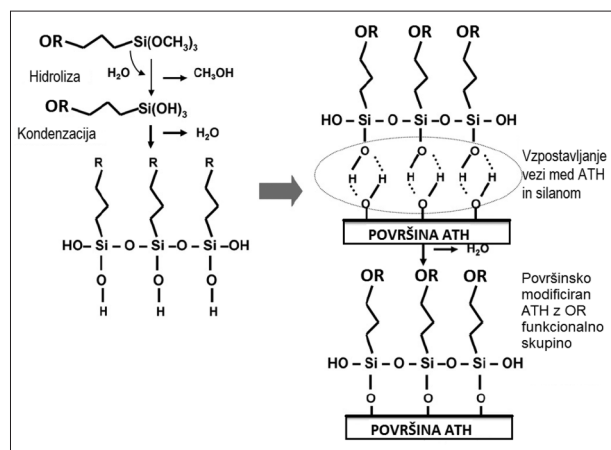
Reakcija se zaključi, ko aktivnostni radikal izgine. To se lahko zgodi z vezavo dveh radikalskih verig ali prenosom radikalskega mesta na neko drugo molekulo.



5.1 REAKCIJE SILANA Z ATH IN MMA

5.1 REACTION OF SILANE WITH ATH AND MMA

Najprej je potrebno hidrolizirati silansko skupino, sledi vezava vodika na površino (Slika 7), nato kondenzacija in polimerizacija ter reakcija s polimerom. Hidroliza se lahko odvija na površini delcev ATH ob prisotnosti vode ali v raztopini pred uporabo. V nevtralnih in rahlo kislih vodnih raztopinah hidroliza poteka hitro, v ogljikovodikovih topilih pa počasi (Walker, 2003). Po hidrolizi silana se vzpostavi kemijska vez med njim in ATH, na drugi strani molekule silana pa imamo akrilno vinilno skupino (OR), ki



Slika 7. Hidroliza in kondenzacija silana ter njegova vezava na površino ATH (prirejeno po Joni et al., 2010)

Figure 7. Hydrolysis and condensation of silane and its reaction with ATH surface (adapted from Joni et al., 2010)

vstopa v radikalsko reakcijo med polimerizacijo MMA. Pri tem se tvori primarna kemijska vez med silanom in PMMA (Joni et al., 2010).

5.2 DODATKI

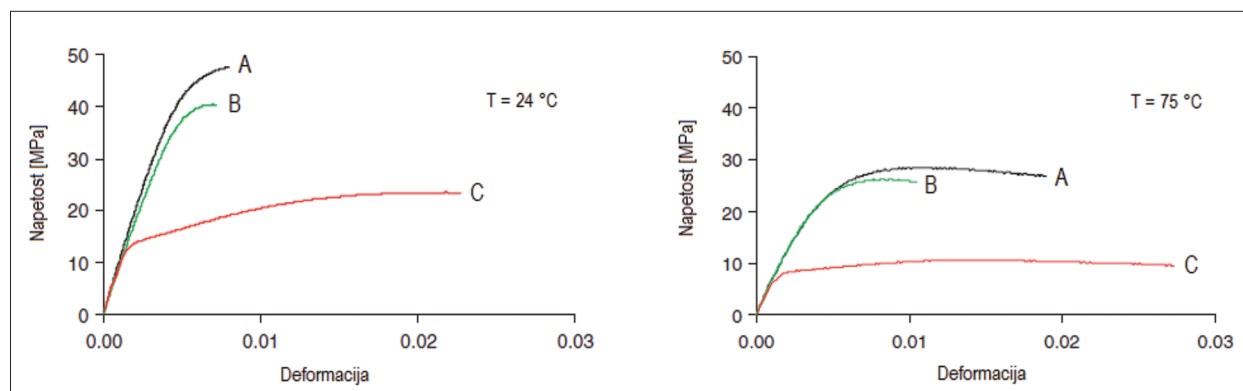
5.2 ADDITIVES

V disperzijo Kerrocka se dodajajo še zamreževalci, razni dodatki, mehčala, tiksotropna sredstva, pigmenti, ločilna sredstva, inhibitorji in katalizatorji. Uporaba dodatkov in njihov vpliv na lastnosti PMMA/ATH kompozitov je opisana tudi v nekaterih patentih, kot so na primer US 4 251 576 (Osborn et al., 1981), US 4 916 172 (Hayashi & Kameda, 1990), US 5 079 279 (Hayashi & Kameda, 1992) in US 5 708 066 (Otremba et al., 1998).

6 LASTNOSTI IN UPORABA KERROCKA

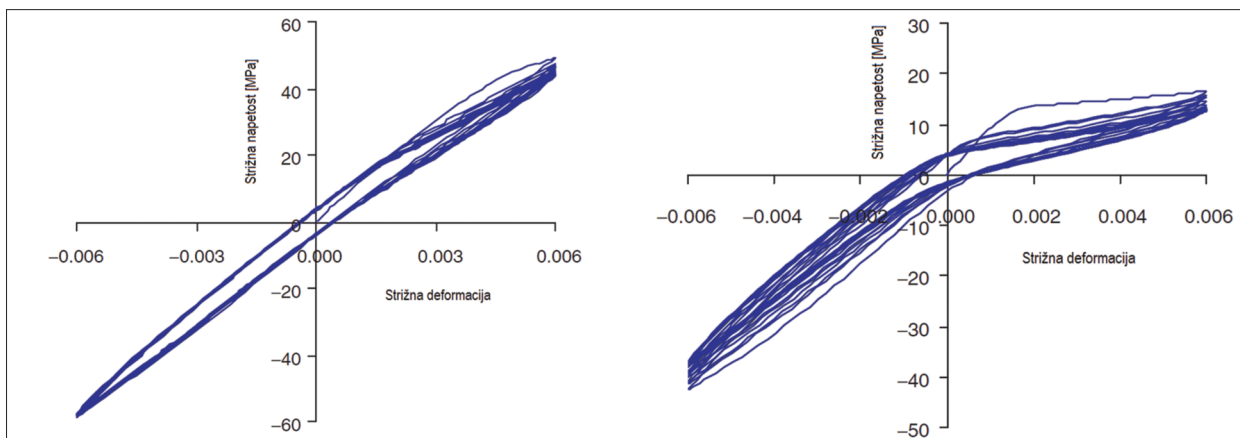
6 CHARACTERISTICS AND APPLICATIONS OF KERROCK

Na splošno so mehanske lastnosti polimernih kompozitov z anorganskimi polnili močno odvisne od morfologije stične površine (oblika delcev polnila, njihova velikost in porazdelitev) (Joni et al., 2010) in stopnje adhezije med polimerno matrico in polnilom. Močnejša adhezijska vez povzroča večjo končno natezno trdnost materiala, a zmanjša njegovo voljnost v primerjavi z voljnostjo polimerne matrice same (Slika 8). Na drugi strani slabitev adhezivne vezi med polnilom in matrico zmanjša končno moč materiala, a poveča njegovo voljnost (Basaran et al., 2008).



Slika 8. Enoosne natezne napetostno-deformacijske krivulje kompozitov: A (s promotorjem adhezije), B (brez dodatkov) in C (z odbojnim promotorjem) pri temperaturah 24 in 75 °C (prirejeno po Basaran et al., 2008)

Figure 8. Uniaxial tension stress-strain curves for composites: A (with adhesion promoting additive), B (without additives) and C (with debonding promoting additive) at 24 and 75 °C (Basaran et al., 2008)



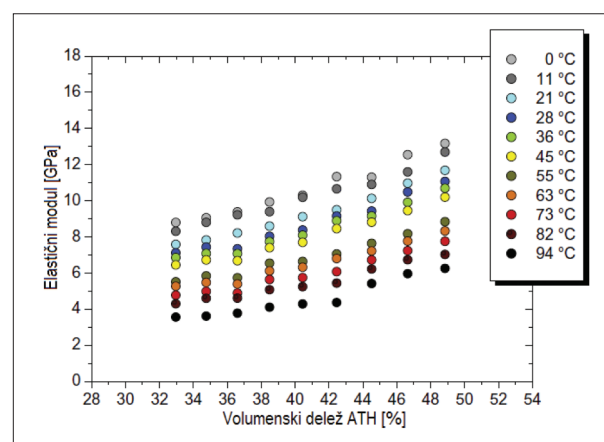
Slika 9. Histerezne zanke strižne napetosti v odvisnosti od strižne deformacije za kompozit s promotorjem adhezije (levo) in odbojnim promotorjem (desno) pri 24 °C in amplitudi strižne deformacije 0,6 % (Basaran et al., 2008)
 Figure 9. Stress-strain hysteresis loops for composite with adhesion promoting additive (left) and composite with debonding promoting additive (right) at different temperatures (Basaran et al., 2008)

Pri kompozitih z dodanim promotorjem adhezije v tlačnem območju ni opaziti degradacije trdnosti, medtem ko se pri kompozitu brez promotorjev kaže degradacija tako v nateznem kot v tlačnem območju. To je verjetno posledica dejstva, da je v območju natega PMMA matrica prevzela vse obremenitve (in s tem tudi lastnosti materiala), saj se ATH odlepi od matrice ali pa se prelomi na intergranularni ravni in nastanejo razpoke. V tlačnem območju se te razpoke zaprejo, vsi sestavni elementi zopet delujejo kot kompozit, v polnilu pa nastane tudi deformacija. Posledica tega je nesimetrična histerezna zanka (Slika 9 desno), ki prikazuje obnašanje kompozita z odbojnim promotorjem (Basaran et al., 2008).

Mehanske lastnosti PMMA/ATH kompozita so tudi odraz disperzije ATH delcev, ki pa je ravno tako odvisna od interakcije na stični površini med ATH in PMMA. Joni in sodelavci (2010) so proučevali vpliv količine silana na mehanske lastnosti kompozita in ugotovili, da se je pri večjih koncentracijah silana (npr. 5 in 25 ut. %) T_g premaknila v nižje temperaturno območje v primerjavi s čistim PMMA in ostalimi PMMA/ATH kompoziti z različno vsebnostjo silana. Zaradi odvečnega silana se struktura stične površine namreč ni izboljšala. Pri 0,5 ut. % deležu silana pa se je T_g kompozita premaknila v rahlo višje temperaturno območje, struktura in adhezija na stični površini pa se je izboljšala. Vpliv silana na Rockwellovo trdnost in Youngov modul je bil podoben vplivu na dinamične mehanske lastnosti. Pri optimalni količini silana (1 ut. % pri 10 ut. % ATH v kompozitu) sta Rock-

wellova trdnost in Youngov modul kazala najboljše vrednosti, kar je posledica interakcije na stični površini med ATH in PMMA. Youngov modul in Rockwellova trdnost PMMA/ATH kompozita sta torej najbolj odvisna od disperzije in ločenosti ATH delcev v polimerni matrici PMMA (Joni et al., 2010).

Elastični modul materiala kot je Kerrock je odvisen od prostorninske vsebnosti ATH in temperature (Slika 10). Z naraščajočo vsebnostjo ATH od 33 do 49 volumenskih % se elastični modul izboljša za 35 %, ob naraščajoči temperaturi od 0 do 94 °C pa se zmanjša za 60 % (Stapountzi et al., 2009).



Slika 10. Elastični modul ATH-PMMA kompozita v odvisnosti od vsebnosti ATH in temperature (Stapountzi et al., 2009)

Figure 10. Flexural modulus vs. filler volume fraction for ATH-PMMA composites (Stapountzi et al., 2009)

Utrudljivost, oziroma življenjska doba kompozita je ravno tako odraz jakosti površinske vezi med polnilom in matrico. Prispevek delcev ATH polnila k mehanizmu prenašanja sil v kompozitu brez promotorja je manjši kot pri kompozitu z dodanim promotorjem adhezije. Ta mehanizem pa je odvisen tudi od jakosti vezi na stični površini med polnilom in matrico. Prisotnost delcev polnila očitno zmanjša življenjsko dobo in poveča utrudljivost kompozita. Ključna razpoka v kompozitu, ki povzroči njegovo pretrganje, nastane šele takrat, ko razpade polimerna matrica, zato je življenjska doba kompozita odvisna od stopnje napetosti v sami polimerni matriki (Basaran et al., 2008).

6.1 OBDELAVA KERROCKA

6.1 PROCESSING OF KERROCK

Kerrock je material z zelo raznovrstno uporabo. Možno ga je uporabljati za kuhinjske pulte, kopalniške elemente (Duggins, 1974a in 1974b), pomivalna korita (Peters & Young, 2003), fasadne elemente (Mihelič, 2011), reklamne panoje, opremo javnih in tako imenovanih čistih prostorov (bolnic, farmacevtskih, medicinskih ter ostalih laboratorijev). Njegovo estetsko vrednost povečajo razni barvni in granitni učinki (Buser et al., 1978; Buser et al., 1979). Lahko ga skobljamo, brusimo, rezkamo, stružimo, vrtamo, termično oblikujemo in lepimo. Vsi postopki obdelave so natančno opisani v navodilih proizvajalca, zato bi se v tem članku posvetili le termičnemu oblikovanju, oziroma tako imenovanemu »termoformiranju«.

Termično oblikovanje Kerrocka omogoča njegova vsebnost PMMA. Termoformiranje poteka tako, da material segrevamo in nato preoblikujemo. Na ta način je mogoče izdelati trajne tridimenzionalne sklede (umivalniki, pomivalna korita, tuš kadi ipd.). Pred termoformiranjem moramo zagotoviti enakomerno segrevanje površine Kerrock plošče, da zmanjšamo oziroma izločimo vpliv temperaturnih gradientov, ki lahko povzročijo pojav gub in razpok (Peters & Young, 2003). Segrevamo jih lahko v toplotračnih pečeh ali vročih stiskalnicah z električnimi grelniki na temperaturi 160 ± 10 °C. Peters in Young (2003) priporočata temperaturni razpon med 135 in 170 °C, vendar poudarjata, da je temperatura odvisna od barve KP in deleža ATH v njej. Pri segrevanju je treba paziti, da temperatura ne preseže meje 170 °C, saj lahko poškoduje površino plošče, pri prenizki temperaturi pa se lahko material ob termo-

formiranju zlomi ali pa na mestu krivljenja zbledi (Peters & Young, 2003). Beljenje materiala med termoformiranjem je posledica lomljenja in dezintegracije delcev polnila. Pri vseh temperaturah in stopnjah termoformiranja se stopnja beljenja večja z vsakim naslednjim ciklom termoformiranja zaradi večje gostote entitet, ki lomijo svetlobo. Pri termoformiranju pri nižjih temperaturah je lomljenje delcev polnila glavni mehanizem deformacije, kar povzroča višjo intenziteto beljenja materiala kot pri termoformiranju pri višjih temperaturah. Nad T_g PMMA je deformacija v polimeru zmerna. Velika mikro-deformacijska območja okoli aglomeratov ATH nad 100 °C pa povzročajo dezintegracijo delcev in ne njihov lom (Günel & Basaran, 2009).

7 RECIKLIRANJE KERROCKA

7 RECYCLING OF KERROCK

Kerrock lahko recikliramo z depolimerizacijo ali pirolizo, vendar oboje zahteva velik energijski vložek. Druga možnost reciklaže je predelava odpadnih produktov z dodajanjem PMMA smole, oziroma drugega plastomera in predelavo zamreženih polimerov s posebnimi dodatki ter ponovnim taljenjem odpadka in preoblikovanjem (Kočevar & Beličič, 2009). Piroliza PMMA je sicer že ustaljen način pridobivanja monomera metilmetakrilata (MMA), saj je pri 450 °C možno pridobiti kar 97,2 % MMA. S pirolizo kompozita PMMA/ATH pa je možno pridobiti le 58 % monomera MMA. Z znižanjem temperature na 400 °C se rahlo poveča delež pridobljenega MMA na 65 %. Tako nizek delež pridobljenega MMA je posledica vpliva vode, ki se sprošča pri pirolizi ATH in kemičnih stabilizatorjev v kompozitu (Kaminsky et al., 2004).

Kočevar in Beličič (2009) sta razvila drugačen postopek recikliranja kompozita. Ta temelji na povezovanju uprašenega kompozitnega odpadka PMMA/ATH. Primerno količino odpadnih prašnih delcev ali delcev do velikosti 1 cm x 1 cm je možno stiskati pri povišani temperaturi (med 120 in 250 °C). Pri takšnih pogojih se delci povežejo v dimenzijsko stabilen, trden končni izdelek s trdno in gladko površino. Glavna prednost tega postopka je, da omogoča cenovno sprejemljivo recikliranje velikih količin prašnega kompozitnega odpadka (Kočevar & Beličič, 2009), vendar je zaradi estetskih in nekaterih mehanskih ter fizikalnih lastnosti neprimeren za uporabo v komercialne namene. Tušar in sodelavci (2011) so za odpadne

produkte Kerrocka v obliki prašnih delcev našli popolnoma drugačno rešitev in jih uporabili kot polnilo za asfalt. Kerrock prah po zrnivosti namreč ustreza polnilu, ki je najmanjša kamnita frakcija v asfaltni zmesi, zato so z dodajanjem prahu izboljšali odpornost asfaltne zmesi na tvorjenje kolesnic in na pokanje pri nizkih temperaturah.

V preteklih nekaj letih so potekale raziskave in razvoj novih načinov reciklaže, oziroma ponovne uporabe odpadnih in stranskih produktov Kerrocka. Skupni imenovalec teh raziskav je bila povezava med Kerrockom in lesom ter ideja o izboljšanju lastnosti lesno-plastičnih kompozitov, oziroma pridobitev novega kompozitnega sistema, ki vključuje Kerrock in les. Avtorji so pri tem proučevali kompatibilnost Kerrocka in lesa, oziroma vzpostavljane adhezije med Kerrockom in lesom. Ugotovljeno je bilo, da je z lepili, ki se najpogosteje uporabljajo v lesni industriji (urea-formaldehid (UF), melamin-urea-formaldehid (MUF) in fenol-formaldehid (FF)), Kerrock mogoče lepiti z lesom in pri tem doseči relativno visoke vrednosti strižne trdnosti lepilnega spoja (Vovk & Šernek, 2015). V teh raziskavah se je najbolje obneslo MUF lepilo, pri katerem je povprečna strižna trdnost lepilnega spoja dosegla $14,72 \text{ N/mm}^2$. V drugem članku avtorji ponudijo rešitev za izboljšanje strižne trdnosti lepilnega spoja med Kerrockom (PMMA/ATH kompozit) in lesom z uporabo lepila za les in silanov (Vovk et al., 2014). Predvideli so, da je na površini Kerrocka dovolj odprtih površin ATH delcev, kjer se nahajajo proste $-OH$ skupine, na katere je možno vezati silane s primernimi funkcionalnimi skupinami in tako modificirati površino Kerrocka. Povprečna strižna trdnost kontrolnih preizkušancev pri tej raziskavi je bila višja kot v prejšnji, in sicer $16,5 \text{ N/mm}^2$, medtem ko so preizkušanci z modificirano površino PMMA/ATH dosegali kar $20,6 \text{ N/mm}^2$ povprečne strižne trdnosti lepilnih spojev (Vovk et al., 2014). Z željo po povečanju strižne trdnosti lepilnega spoja med PMMA/ATH kompozitom in lesom je skupina raziskovalcev proučevala vpliv modifikacije površine PMMA/ATH plošč z zračno plazmo pred lepljenjem z MUF lepilom (Vovk et al., 2017). Rezultati preizkusov strižne trdnosti v teh raziskavah niso pokazali značilnih razlik med vzorci modificiranimi s plazmo in tistimi brez površinske modifikacije. Na podlagi teh raziskav je tudi nastal patent, v katerem avtorji predstavljajo postopek za pridobivanje kompozitnega materiala iz odpadnih produktov PMMA/ATH kompozita, vezanih z amino-

plastičnimi ali fenolnimi lepili, kjer delež lesa, oziroma lignoceluloznih materialov, lahko dosega 89 ut. % (Vovk et al., 2015). V nadaljnjih raziskavah je skupina raziskovalcev izvedla poskuse nanašanja odpadnega PMMA/ATH prahu na lesno površino s pomočjo plazme (Wallenhorst et al., 2015). Avtorjem v tem delu ni uspelo pridobiti homogenega sloja, ugotovili pa so, da je pri procesu nanašanja prahu na lesno površino prišlo do jedkanja PMMA na delcih PMMA/ATH prahu. Posledično so se odkrile nove površine ATH delcev, zaradi česar se je površinska energija PMMA/ATH prahu povišala. Z idejo o pridobitvi homogenega sloja PMMA/ATH prahu na lesni površini so raziskovalci v podobnem postopku nanašanja prahu na površino dodali uprašeno fenol-formaldehidno smolo (Wallenhorst et al., 2017). Ti rezultati so pokazali, da takšen »premaz« oziroma film PMMA/ATH prahu na lesni površini vzdrži približno 2000 abrazijskih ciklov, kar pomeni, da so znatno izboljšali lastnosti nanosa. Takšen »premaz« ima tudi praktični potencial, saj je vodoodporen in ognjeodporen, s čimer zagotovo lahko razširi uporabnost lesa.

8 ZAKLJUČEK

8 CONCLUSION

Kerrock je trd kompozitni material, uporaben v gradbeništvu in notranjem opremljanju. Sinergija PMMA in ATH, ki sta glavni sestavini tega kompozita, omogoča enostavno obdelavo in termoformiranje Kerrocka. Njegove mehanske lastnosti so zelo odvisne od morfologije stične površine in adhezije na stični površini med polnilom in polimerno matrico ter od disperzije ATH delcev. Na strukturo stične površine je možno vplivati z različnimi koncentracijami silana, zato je pomembno, da je le-ta optimalna. Na elastični modul kompozita najbolj vplivata vsebnost ATH in temperatura.

Kerrock je zaradi svojih dobrih mehanskih lastnosti, trajnosti in enostavne obdelave ter široke palete različnih barv in barvnih učinkov zelo uporaben material. Vendar pa je na njegovo uporabnost smiselno gledati tudi iz drugega zornega kota: ponovne uporabe, oziroma recikliranja industrijskih odpadkov in gradbenih elementov. Kompozitni prah, ki je najobilnejši ostanek pri proizvodnji Kerrocka in nastane pri brušenju kompozitnih plošč, je možno dodajati asfaltu ali pa iz njega narediti nov kompozitni material z dodatkom PMMA smole, a so stroški pri sled-

njem previsoki za smotrno izdelavo uporabnega materiala. Zaradi posebnosti tega kompozita so znani načini recikliranja povezani s previsokimi stroški ali premajhnim izkoristkom materiala. Recikliranje Kerrocka in njemu podobnih materialov zato ostaja velik izziv, s katerim se je potrebno spopasti. Gre namreč za kvaliteten produkt z veliko dodano vrednostjo, ki ga je smiselno v popolnosti izkoristiti. S tem namenom so raziskovalci v zadnjih letih iskali rešitve v povezovanju odpadnih produktov Kerrocka oz. PMMA/ATH kompozita z lesom in prišli do koristnih rezultatov: od nanosa prahu na leseno površino do kompozita Kerrock-les (oz. PMMA/ATH-les).

9 POVZETEK

9 SUMMARY

Kerrock is the commercial name for the hard composite material produced by Kolpa, d.d. From Metlika (Slovenia). It can be classified as a hybrid, organic-inorganic material, as it contains 40% by weight of polymethyl methacrylate (PMMA, organic component) and 60% by weight of aluminium hydroxide (ATH, an inorganic component), along with additives for achieving specific properties. A chemical bond via silane with a methacrylic functional group is established between the organic and inorganic components. Kerrock is manufactured in the form of composite panels of various dimensions, colours and structures that can be used for indoor equipment and façade elements. Such a material can be combined with many others, including wood, as it has many properties similar to it. In the article we present the properties of Kerrock constituents, their mutual interactions and the chemical basis of its production. Descriptions of the properties and uses of this composite material, the possibility of recycling and reuse of waste products, and a description of Kerrock's compatibility with wood have also been presented.

The PMMA macromolecule was synthesized for the first time in 1931, and is classified as a polyaddition resin based on a methyl methacrylate monomer (MMA). PMMA is a transparent, rigid and solid thermoplast, resistant to atmospheric influences and UV radiation. The upper temperature at which the PMMA is used for processing is 90 °C, while the glass transition temperature (T_g) is about 105 °C. PMMA is well tolerated in aliphatic hydrocarbons,

non-polar solvents, aqueous solutions of acids and bases, fats and alcohols (up to 30%). However, it is not resistant to polar solvents (chlorinated hydrocarbons), alcohols (over 30%), benzene-containing gasoline, spirits, nitroacids and nitrosilicates, concentrated acids and certain plasticizers. PMMA is physiologically non-hazardous or non-toxic. It can be sprayed, extruded, thermoformed, glued, welded, sanded and drilled. In the construction industry, PMMA is used for glazing roofs, partition walls for greenhouses and winter gardens, sanitary installations, bath tubs, shower tubs, swimming pools, shower stalls, sanitary cells, transparent pipelines, and so on.

ATH ($\text{Al}(\text{OH})_3$) is a fragile, white, non-toxic material soluble in strong acids and bases, relatively soft (Mohs strength is about 3) and non-abrasive. It is an active antipyretic and one of the most widely used self-extinguishing fillers for polymers and polymer composites. It is popular due to its low price, good damping ability and non-toxic smoke, availability in a wide range of sizes and shapes and the possibility of surface treatment. It is often necessary to add 50% or more of the filler, which should be evenly distributed in the polymer matrix to provide a good resistance to fire. At combustion, ATH is active both in solid and powder form and is therefore very effective in suppressing fire and smoke. The onset of thermal decomposition of ATH is between 180 and 200 °C when water starts to form and the alumina is formed (Equation 2). Further decomposition continues between 220 and 440 °C. In complete decomposition ATH loses 34.6% of water and its recrystallization temperature is 2000 °C.



The decomposition reaction ATH has several different effects on the burning of the polymer in which it is located, as follows:

- It absorbs 1050 kJ/kg of ATH, which makes the polymer cool down,
- the resulting Al_2O_3 in the decomposition of ATH forms the thermal insulation of the polymer,
- relaxed water vapor dilutes the concentration of flammable gases and forms a gas protective layer.

When using aluminium hydroxide as filler it is necessary to ensure its compatibility with the polymer. The solution is to use organo-silanes, to which ATH responds well, and these are a good choice for modifying its polar surface. Low molecular weight silanes containing organic functional groups with affinity for a particular polymer are coupling agents used to strengthen thermoplasts and thermosets with glass fibres or other mineral fillers. In Kerrock, silane is a strong link between ATH and PMMA because the organic functional group of the silane matches the matrix of the polymer and establishes a chemical bond between these two elements. Commercially available silanes usually have an alkoxy base and contain one organic group (OR) which is bonded to silicon: $R - Si - (OR)_3$. R represents a hydrolysing group that reacts with hydroxyl groups on the surface of the filler. The OR group is linked through a hydrolytically stable bond between silicon and carbon. It may be inert or it contains reactive functional organic groups such as vinyl, amino, acrylic and so on.

The main mechanism for the Kerrock synthesis is the radical polymerization of MMA to PMMA. Free radical polymerization includes unstable chemical types (R - free radicals) with free electrons. Free radicals can be formed by a chemical reaction, e.g. with the breakdown of organic peroxides. The radical polymerization of PMMA in Kerrock production follows three steps: an initiation phase, propagation phase (chain growth) and termination phase (interruption or completion of the reaction).

The mechanical properties of polymeric composites with inorganic fillers strongly depend on the morphology of the contact surface (the shape of the filler particles, their size and distribution) and the adhesion rate between the polymer matrix and the filler. A stronger adhesion bond produces a higher final tensile strength of the material, but reduces its elasticity compared to the polymer matrix itself. On the other hand, the weakening of the adhesive bond between the filler and matrix reduces the final strength of the material, but increases its flexibility. The mechanical properties of the PMMA/ATH composite are also a reflection of the dispersion of ATH particles, which is also dependent on the interaction on the contact surface between ATH and PMMA. The amount of silane also affects mechanical properties. Thus, at a higher silane content (e.g., 5 and

25% by weight), Tg can move to a lower temperature range compared to pure PMMA and PMMA/ATH composites with a lower silane content. The Young's modulus and the Rockwell strength of the PMMA/ATH composite are most dependent on the distribution of the ATH particles in the polymer matrix. The elastic modulus of materials such as Kerrock depends on the volume content of ATH and the temperature. With an increasing volume of ATH from 33 to 49%, the elastic modulus is improved by 35% and decreases by 60% as the temperature from 0 to 94 °C.

Kerrock is a material with a very diverse range of applications. It is possible to use it for kitchen worktops, bathroom elements, sinks, façade elements, billboards, public equipment and so-called clean rooms (as seen in hospitals, pharmaceutical, medical and other laboratories). Its aesthetic value is enhanced by various colour and granite effects that can be achieved. It can also be planed, sanded, milled, turned, drilled, thermoformed and glued.

Kerrock can be recycled by depolymerization or pyrolysis, but both require a large energy input. PMMA pyrolysis is already a conventional method for the production of methyl methacrylate (MMA), as it is possible to obtain as much as 97.2% MMA at 450 °C. With the pyrolysis of the PMMA / ATH composite, only 58% of the MMA monomer can be obtained. By lowering the temperature to 400 °C, the proportion of MMA obtained is increased to 65% by weight. Another possibility for recycling is based on the connection of powdered composite waste PMMA/ATH at an elevated temperature (between 120 and 250 °C), whereby the particles connect in a dimensionally stable, solid end product with a solid and smooth surface. Other researchers found a completely different application for powdered PMMA/ATH, and used it as a filler for asphalt, which improved the resistance of the asphalt mixture to damage due to wheels and cracks at low temperatures.

In the past few years the research and development of new methods of recycling or re-use of Kerrock waste and by-products have been carried out. The common denominator of these studies is the connection between Kerrock and wood, and the idea of improving the properties of so-called wood-plastic composites, or the acquisition of a new composite system that combines Kerrock and wood. The authors studied the compatibility of Kerrock and wood

by studying the adhesion between them. It has been found that the adhesives that are most commonly used in the wood industry (urea-formaldehyde (UF), melamine urea-formaldehyde (MUF) and phenol-formaldehyde (FF)) can provide good bond strength (approximately 15 N/mm²) between Kerrock and wood. This adhesive bond can be improved using silanes (average shear strength of the adhesive system reached 20 N/mm²), while the results of attempts to improve the adhesive compound by pre-treatment of the PMMA/ATH composite with air plasma are not significantly different from those of control tests. On the basis of these investigations, a patent was created in which the authors presented a process for the production of a composite material from waste products of the PMMA/ATH composite bonded with aminoplastic or phenolic adhesives, where the proportion of wood or lignocellulosic materials can reach 89 weight%. In further research, a team of researchers carried out experiments on the application of waste PMMA/ATH powder onto a wood surface using plasma. The authors did not manage to obtain a homogeneous layer, but in further studies they added a powdered FF resin, which significantly improved the coating.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENTS

Prispevek je nastal v okviru projekta KROP Kolpa d.d. - 000477, ki ga sofinancirajo Ministrstvo za gospodarski razvoj in tehnologijo (MGRT), Evropska unija ter podjetje Kolpa, proizvodnja in predelava plastičnih mas, d.d., Metlika in v okviru raziskovalnega programa »Les in lignocelulozni kompoziti«. Raziskovalni program št. P4-0015 je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

LITERATURA IN VIRI

LITERATURE

Balachandran, N. A., Kurian, P., & Joseph, R. (2012). Effect of aluminium hydroxide, chlorinated polyethylene, decabromo biphenyl oxide and expanded graphite on thermal, mechanical and sorption properties of oil-extended ethylene-propylene-diene terpolymer rubber. *Materials and design*, 40: 80 – 89.

Basaran, C., Nie, S., Hutchins, C. S., & Ergun, H. (2008). Influence of interfacial bond strength on fatigue life and thermo-mechanical

behavior of a particulate composites: an experimental study. *International journal of damage mechanics*, 17: 123 – 147.

Bunker, S. P., Alsina, M. F., Mundra, M. K., & Guerra, S. (2008). Investigation of cracking behavior of halogen free flame retardant systems. *International wire & cable symposium: proceedings of the 57th IWCS*. http://iwcs.omnibooksonline.com/data/papers/2008/4_2.pdf (Oktober 2012).

Buser, K. R., Roedel, M. J., & Vassiliou, E. (1978). Simulated granite and its preparation. *United states patent US 4 085 246*: 18 str.

Buser, K. R., Roedel, M. J., & Vassiliou, E. (1979). Simulated granite and its preparation. *United states patent US 4 159 301*: 17 str.

Camino, G., Maffezzoli, A., Braglia, M., de Lazzaro, M., & Zammarrano, M. (2001). Effect of hydroxides and hydroxycarbonate structure on fire retardant effectiveness and mechanical properties in ethylene-vinyl acetate copolymer. *Polymer degradation and stability*, 74: 457 – 464.

Cardarelli, F. (2008). *Polymers and elastomers. V: Materials handbook*. London, Springer: 691 – 750.

Chibowski, E., Ontiveros-Ortega, A., & Perea Carpio, R. (2002). On the interpretation of contact angle hysteresis. *Journal of adhesion science and technology*, 16: 1367 – 1404.

Duggins, R. B., Ford, C., & Miller, H. C. (1974 a). Filled polymethyl methacrylate article and a process for its manufacture. *United states patent US 3 827 933*: 5 str.

Duggins, R. B., & Ford, C. (1974 b). Use of alumina trihydrate in a polymethyl methacrylate article. *United states patent US 3 847 865*: 6 str.

Ferriol, M., Gentilhomme, A., Cochez, M., Oget, N., & Mieloszynski, J. L. (2003). Thermal degradation of poly(methyl methacrylate) (PMMA): modelling of DTG and TG curves. *Polymer degradation and stability*, 79: 271 – 281.

Forrest, M. J. (2002). *Analysis of plastics*. Shrewsbury, Smithers Rapra: 158 str.

Garcia, M., Hidalgo, J., Garmendia, I., & Garcia-Jaca, J. (2009). Wood-plastic composites with better fire retardancy and durability performance. *Composites: Part A*, 40: 1772 – 1776.

Gunel, E. M., & Basaran, C. (2009). Micro-deformation mechanisms in thermoformed alumina trihydrate reinforced poly(methyl methacrylate). *Materials science and engineering A*, 523: 160 – 172.

Hayashi, T., & Kaameda, K. (1990). Reaction curable composition and artificial marble. *United states patent US 4 916 172*: 7 str.

Hayashi, T., & Kaameda, K. (1992). Reaction curable resin composition and artificial marble. *United states patent US 5 079 279*: 8 str.

Holysz, L., Chibowski, E., & Terpilowski, K. (2008). Influence of ambient humidity on the apparent surface free energy of poly(methyl methacrylate) (PMMA). V: *Contact angle, wettability and adhesion*, vol. 5. Mittal, K. L. (ed). Zeist, VST: 95 – 111.

ISO 19712. (2007). *Plastics - decorative solid surfacing materials – determination of properties-sheet goods*: 42 str.

Jagger, R. G., & Okdeh, A. (1995). Thermoforming polymethyl methacrylate. *The journal of prosthetic dentistry*, 74: 542 – 545.

- Joni, I. M., Nishiwaki, T., Okuyama, K., Isoi, S., & Kuribayashi, R. (2010). Enhancement of the thermal stability and mechanical properties of PMMA/aluminum trihydroxide composite synthesized via bead milling. *Powder technology*, 204: 145 – 153.
- Kaminsky, W., Predel, M., & Sadiki, A. (2004). Feedstock recycling of polymers by pyrolysis in a fluidised bed. *Polymer degradation and stability*, 85: 1045 – 1050.
- Kashiwagi, T., Inaba, A., Brown, J. E., Hatada, K., Kitayama, T., & Masuda, E. (1986). Effects of weak linkages on the thermal and oxidative degradation of poly(methyl methacrylates). *Macromolecules*, 19: 2160 – 2168.
- Deanin, R. D., & Mead, J. L. (2007). *Synthetic resins and plastics*. V: Kent and Riegel's handbook of industrial chemistry and biotechnology. Kent, J. A. (ed.). New York, Springer: 623 – 688.
- Kočevár, G., & Beličič, A. (2009). Postopek za izdelavo stisnjene plošče iz prahu kompozita polimetilmetakrilata in aluminijevega hidroksida. Patent SI 22995: 10 str.
- Laoutid, F., Bonnaud, L., Alexandre, M., Lopez-Cuesta, J. M., & Dubois, P. (2009). New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites. *Materials science and engineering R*, 63: 100 – 125.
- Mihelič, M. (2011). Umetni kompozitni material kerrock in njegova uporaba v gradbeništvu. Diplomsko naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Operativna smer: 73 str.
- Mouritz, A. P., & Gibson, A. G. (2006). *Flame retardant composites*. V: Fire properties of polymer composite materials. Dordrecht, Springer: 237 – 286.
- Navodnik, J., & Kopčič, M. (1998). *Plastik-orodjar*. Velenje, Navodnik: 574 str.
- Osborn, P. G., Osmond, D. W. J., & Thorpe, B. J. (1981). Inorganic reinforcing phase dispersed and bonded to polymer matrix. United states patent US 4 251 576: 23 str.
- Otremba, E. D., Friscia, R. M., & McBride, E. F. (1998). Reaction curable composition and solid surface material. United states patent US 5 708 066: 4 str.
- Peters, C. R., & Young, J. E. (2003). Process for making bowls comprising acrylic plastic filled with alumina trihydrate. United states patent US 6 554 944 b1: 17 str.
- Peterson, J. D., Vyazovkin, S., & Wight, C. A. (1999). Stabilizing effect of oxygen on thermal degradation of poly(methyl methacrylate). *Macromolecular rapid communications*, 20: 480 – 483.
- Pielichowski, K., & Njuguna, J. (2005). Thermal degradation of polymeric materials. *Shrewsbury, Smithers Rapra*: 320 str.
- Radelczuk, H., Holysz, L., & Chibowski, E. (2002). Comparison of the Lifshitz-Van der Waals/acid-base and contact angle hysteresis approaches for determination of solid surface free energy. *Journal of adhesion science & technology*, 16: 1547 – 1568.
- Rothon, R. (2003). *Particulate-filled polymer composites* (2nd edition). Shrewsbury, Smithers Rapra: 560 str.
- Saechtling, H. (1995). *International plastics handbook for the technologist, engineer and user*. 3rd edition. New York, Hanser Gardner publications: 595 str.
- Shi, Z., Fu, R., Agathopoulos, S., Gu, X., & Zhao, W. (2012). Thermal conductivity and fire resistance of epoxy molding compounds filled with Si₃N₄ and Al(OH)₃. *Materials and design*, 34: 820 – 824.
- Stapountzi, O. A., Charalambides, M. N., & Williams, J. G. (2009). Micromechanical models for stiffness prediction of alumina trihydrate (ATH) reinforced poly (methyl methacrylate) (PMMA): Effect of filler volume fraction and temperature. *Composites science and technology*, 69: 2015 – 2023.
- Tušar, M., Beličič, A., & Prešeren, M. (2011). Asfalt z dodanim PMMA/ATH: Patentna prijava: P-201100092. Ljubljana, Urad republike Slovenije za intelektualno lastnino. 6 str.
- Vovk, M., Beličič, A., & Šernek, M. (2014). Zdržljivost lesa s kompozitom iz polimetilmetakrilata in aluminijevega hidroksida. *Znanstveno srečanje Gozd in les*.
- Vovk, M., & Šernek, M. (2015). Lepljenje lesa in Kerrocka. *Pedagoška obzorja* 2 (4): 58.
- Vovk, M., Šernek, M., & Beličič, A. (2015). Postopek za pridobivanje kompozitnega materiala iz odpadnih produktov PMMA/ATH kompozita, vezanih z aminoplastičnimi ali fenolnimi lepili. Patent SI 24705 A: 10 str.
- Wallenhorst, L. M., Dahle, S., Vovk, M., Wurlitzer, L., Loewenthal, L., Mainusch, N., ... & Viöl, W. (2015). Characterisation of PMMA/ATH layers by means of atmospheric pressure plasma powder deposition. *Advances in Condensed Matter Physics*, 2015, 12 str.
- Wallenhorst, L. M., Rerich, R., Vovk, M., Dahle, S., Militz, H., Ohms, G., & Viöl, W. (2017). Enhancing the abrasion resistance of PMMA/ATH layers realised by means of atmospheric pressure plasma powder deposition on wood. Predstavitev plakata na 11. Mednarodni konferenci Wood science and engineering in the third millennium, ICWSE 2017 2.-4. November 2017, Braşov, Romunija.
- Walker, P. (2003). Silane and other adhesion promoters in adhesive technology. V: *handbook of adhesive technology*. Second edition. Pizzi, A., & Mittal, K. L. (eds.). New York, Marcel Dekker, inc.: 209-225.

MOŽNOSTI UPORABE LESA V DODAJALNIH TEHNOLOGIJAH (3D-TISKANJU)

POSSIBLE USES OF WOOD IN ADDITIVE TECHNOLOGIES (3D PRINTING)

Mirko Kariž¹, Milan Šernek¹, Manja Kitek Kuzman^{1*}

UDK 655.3.066.51:676.15

Izvleček / Abstract

Pregledni znanstveni članek / Review scientific article

Izvleček: Dodajalne tehnologije so v zadnjem desetletju dosegle velik razvoj na področju same tehnike kot tudi materialov za tiskanje. Poseben poudarek je na razvoju materialov, ki bi bili cenejši, iz naravnih virov, brez izpustov škodljivih snovi med postopkom izdelave, z možnostjo uporabe odpadnih surovin ter možnostjo reciklaže po odsluženju. Les oziroma lesni ostanki so ena od možnih surovin, ki bi lahko bile uporabljene za 3D-tiskanje v kombinaciji z naravnimi in sintetičnimi polimeri. Predvidevamo, da se bo v razvoju dodajalnih tehnologij z uporabo lesa širil tudi spekter njihove uporabe na gradbenem področju, recimo tudi pri gradnji montažnih hiš. Narejen je pregled objav na temo 3D-tiskanja v povezavi z naravnimi surovinami, s poudarkom na lesni masi ter postopkih, kjer je možna uporaba lesnih delcev.

Ključne besede: 3D-tiskanje, dodajalne tehnologije, les, lesni ostanki, lesno-plastični kompoziti

Abstract: Additive manufacturing technologies have developed greatly over the last decade in terms of technology and printing materials. Special emphasis is placed on the development of cheaper materials that are derived from natural sources, without the release of harmful substances during the manufacturing process, with the possibility of using waste materials and recycling after service life. Wood or wood residues are among the potential raw materials that could be used for 3D printing in combinations with natural and synthetic polymers. It is anticipated that, with the development of additive technologies, the use of wood will also expand to the area of structural elements, such as in the construction of prefabricated houses. A review of publications on the topic of 3D printing with natural raw materials with an emphasis on wood biomass and technologies, where the use of wood particles is possible, was made.

Keywords: 3D printing, additive technology, wood, wood residues, wood-plastic composites

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Dodajalne tehnologije (ang. additive technologies) je izraz za vrsto različnih tehnik izdelave, katerim je skupno grajenje izdelka po plasteh/slojih. Pogovorno se te tehnologije pogosto imenuje kar 3D-tiskanje, kar izhaja iz ene prvih tehnik, kjer je bilo vezivo nanašano na podoben način kot pri običajnem 2D-tiskanju – brizganje tekočine iz posebnih kartuš (v primeru 3D-tiska – brizganje tekočega veziva na plast praškastega materiala). Nekoč pogost izraz je bil tudi hitro prototipiranje (ang. Rapid prototyping), čemur je bila ta tehnika prvotno namenjena - hitri izdelavi prototipov, vendar se ta izraz vse manj uporablja, saj tudi izdelki niso več samo prototipi, ampak lahko služijo tudi kot pravi izdelki, unikatni, maloserijski, ali pa individualno posamez-

niku prilagojeni izdelki. Veliko razvoja je bilo narejena na samih tehnikah kot tudi materialih. Ob nihanju cen 3D-tiskalnikov na trgu so le-ti postali dostopnejši tudi za vsakdanjo domačo uporabo tiskanja. Že število iskanj termina »3D printing« na Google pokaže izrazit porast: od leta 2007 do 2015 se je število iskanj tega termina 25-krat povečalo (Wimmer et al., 2015).

Osnovni princip dodajalnih tehnologij je grajenje izdelka po plasteh ali slojih, z dodajanjem materiala v slojih, za razliko od klasičnih obdelovalnih tehnik, kjer izdelek običajno izdelamo z odvzemanjem materiala (odrezovalne tehnike), preoblikovanjem materiala (npr. litje, kovanje) ali pa povezovanjem (varjenje, pritrjevanje) (Conner et al., 2014). Izdelava modelov s 3D-tiskanjem je razmeroma enostavna, saj digitalnemu modelu izdelka z ustreznim programom omogočimo razrez STL/AMF/OBJ datotek na tiskalne plasti, ki določijo 3D-tiskalniku pot, ki jo mora opraviti do celovitega končnega izdelka. Pri izdelovanju z odvzemanjem materiala orodje vedno potrebuje prosto

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenija

* e-pošta: manja.kitekuzman@bf.uni-lj.si

pot do vseh področij odvzemanja materiala (Warnier, 2014), čemur moramo prilagoditi obliko izdelka. Pri 3D-tiskanju tega problema ni, saj imamo zaradi slojevite gradnje (začasen) dostop do vseh površin – tudi npr. kasnejših notranjih ploskev. Zaradi tega je možno ustvariti oblike, ki jih je z drugimi tehnikami praktično nemogoče brez izdelave raznih kalupov, sestavljanja posameznih delov itd.

Tehnologija 3D-tiskanja se je razvila po l. 1980, ko so vložili prve patentne zahteve za hitro prototipiranje (dr. Kodama, Japonska) ter stereolitografijo

(Chuck Hull, 1986). Sledil je razvoj tehnike ekstrudiranja – modeliranja s spajanjem slojev (Fused deposition modelling FDM), tej pa razvoj ostalih tehnik, npr. SLS tehnologije (selektivno lasersko sintranje), tehnologije LOM (nalaganje krojenih plasti) in pojav prvih tiskalnikov na trgu (povzeto po Glavičič, 2014 ter The Free Beginner's Guide, 2017).

Pojavile so se tudi različne uporabe od medicine (tisk ledvic), metode bio-tiskanja in 3D-tiskanja z živimi celicami, izdelana je bila proteza noge z vsemi gibljivimi deli (povzeto po Glavičič, 2014 ter The Free

Preglednica 1. Razvrstitev postopkov dodajalnih tehnologij po ASTM standardu F2792 (prir. po Gao et al., 2015.)
Table 1. Classification of additive technologies according to ASTM standard F2792 (modified by Gao et al., 2015)

	Kategorija	Tehnologija	Material	Vir energije	Prednosti/slabosti
Vezalni procesi	Spajanje slojev praškastega materiala	Selektivno lasersko sintranje - Selective laser sintering (SLS)	Poliamidi/polimeri	Laser	+ Visoka natančnost + Visoka trdnost in togost - Podporna struktura + Deli polne gostote
		Neposredno lasersko sintranje kovin - Direct metal laser sintering (DMLS)	Praški kovin, keramični praški		
		Selektivno lasersko taljenje - Selective laser melting (SLM)			
		Taljenje z elektronskim snopom - Electron beam melting (EBM)		Elektronski žarek	
	Polimerizacija v kadi	Stereolitografija – Stereolithography (SLA)	Fotopolimeri, keramika (alumina, Zirconia, PZT)	UV svetloba	+ Visoka hitrost izdelave + Dobra resolucija izdelka - Visoka cena materialov
	Brizganje veziva	Kapljično nanašanje ali brizganje veziva - Indirect inkjet printing (3DP)	Polimeri v prahu (mavec, smole), keramični praški, kovinski prah	Toplota	+ Barvno tiskanje + Široka izbira materialov - Poobdelava-impregnacija s smolo - Poročnost izdelkov
Dodajalni procesi	Laminacija plasti	Nalaganje krojenih plasti - Laminated object manufacturing (LOM)	Plastične folije, pločevine, keramični trakovi	Laser	+ Nizki stroški materiala, strojev, postopka - Težavno odstranjevanje ostanka materiala
	Ekstrudiranje materiala	Modeliranje s spajanjem slojev/ Ciljno nalaganje - Fused deposition modelling (FDM)	Termoplastični polimeri, glina, paste, kovinske paste	Toplota	+ Poceni tiskalniki + Hkratno tiskanje z več materiali - Omejena resolucija - Slaba kakovost površine
		Ekstrudiranje materiala - Contour crafting			
	Brizganje materiala	Brizganje veziva - Polyjet/inkjet tiskanje	Fotopolimeri, vosek	Toplota/UV svetloba	+ Hkratno tiskanje z več materiali + Visoka kakovost površine - Nizka trdnost izdelkov
	Lasersko navarjanje	Lasersko navarjanje - Laser enginered net shaping (LENS)	Staljen kovinski prah	Laser	+ Popravilo uničenih/izrabljenih delov + Primerno za funkcionalno uporabo - Potrebna poobdelava
		Navarjanje z elektronskim snopom - Electronic beam welding (EBW)			

Beginner's Guide, 2017). Uporaba se je razširila tudi na področja aeronavtične industrije (Kroll & Artzi, 2011), avtomobilske industrije, arhitekture (Wong & Hernandez, 2012), na umetniška področja, področja poučevanja, restavriranja (Short, 2015), ter ostale nišne aplikacije (glasbene aplikacije- zvočniki, glasbila ...). Leta 2014 je NASA na krovu mednarodne vesoljske postaje 3D natisnila prvi predmet, kitajsko podjetje pa v 24 urah uspešno natisnilo 10 hiš iz cenovno ugodnega gradbenega materiala, mešanice ostankov drugih gradbenih procesov in cementa (povzeto po Glavičič, 2014 ter The Free Beginner's Guide, 2017).

Pomemben mejnik je bil tudi razvoj 3D-tiskalnika na Univerzi Bath v Veliki Britaniji, ki je sposoben natisniti sestavne dele za nov 3D-tiskalnik. Ob tem je nastal odprtokodni projekt RepRap, ki spodbuja inovatorje po celem svetu v nadaljnji razvoj te tehnologije. Danes je na osnovi RepRap tiskalnika nastalo več kot 250 vrst 3D-tiskalnikov, ki so jih razvili člani skupnosti, in tako predstavlja resno konkurenco komercialnim proizvajalcem (povzeto po Glavičič, 2014 ter The Free Beginner's Guide, 2017).

Okrog l. 2009 je postal 3D-tisk dostopen širši javnosti – pred tem so bili tiskalniki dragi, namenjeni predvsem razvoju, prototipom in raziskavam: podjetje Makerbot je začelo prodajati komplete za sestavo hišnih 3D-tiskalnikov. Temu je sledil nagel razvoj in porast prodaje novih 3D tiskalnikov (povzeto po Glavičič, 2014 ter The Free Beginner's Guide, 2017).

3D-tiskanje nekateri označujejo kot del četrte industrijske revolucije. 3D-tiskanje naj bi spremenilo dožemanje digitalnega in fizičnega sveta in spremenilo ustaljene proizvodne in transportne poti. Digitalne modele je mogoče enostavneje in hitreje pošiljati po celem svetu in izdelati na samem mestu uporabe, odpade transport fizičnih predmetov, manjša je omejenost z obliko izdelkov, možne so individualizacije vsakega izdelka kupcu. Digitalni model je namreč možno hitro spremeniti v primerjavi z npr. spremembo kalupa za brizganje izdelkov (Nigro, 2017). Sami izdelki so lahko narejeni na mestu uporabe, s tem pa odpade zunanje izvajanje dejavnosti. Prav tako ni odrezkov in s tem odpadkov, kar lahko vodi v proizvodnjo brez odpadkov (Berman, 2012), ki poleg zmanjšane transporta vodi k proizvodnji z zmanjšanim ogljičnim odtisom.

Ocenjujejo (Nigro, 2016), da bo delež 3D-tiskanja naraščal s 30 % letno rastjo in dosegel vrednost

18 milijard dolarjev do 2021, kar pa je še vedno malo v celotni proizvodni industriji.

Med postopki 3D-tiskanja sicer obstaja precej razlik, vendar jih lahko razdelimo na procese, ki material pri postopku vežejo med seboj (vezalni procesi), ter postopke, kjer material odlagamo (odlagalni postopki) (Preglednica 1). Prednost vezalnih procesov je v tem, da pri tiskanju v prostor tiskanja naneseemo celoten sloj materiala, ki ga utrdimo (povežemo) samo na zelenih mestih. Preostali material (neutrjen) pa služi tudi kot podpora v fazi tiskanja ter ga po končanem tisku enostavno odstranimo (odcejanje smole, stresanje praškastega materiala) in uporabimo pri naslednjem tiskanju. Pri odlagalnih procesih pa material odlagamo na točno določena mesta v vsakem sloju, pri zahtevnejših izdelkih (npr. previsi na izdelku) pa moramo istočasno graditi podporo strukturo, ki jo moramo na koncu fizično odstraniti.

2 PREGLED 3D-TEHNIK TISKANJA V POVEZAVI Z NARAVNIMI SUROVINAMI

2 REVIEW OF 3D-PRINTING TECHNIQUES USING NATURAL RAW MATERIALS

Zaradi vse večjih zahtev trga po vedno novih in bolj zanimivih izdelkih se razvijajo nove tehnologije 3D- tiskanja, sočasno pa se razvijajo tudi okolju prijazni, (ter tudi cenovno ugodni) materiali, namenjeni 3D- tiskanju. Na trgu obstajajo številni materiali, ki omogočajo različne končne izdelke – lahko gre samo za prototipe, ki so samo za vizualno predstavbo in ne prenesejo večjih obremenitev ali pa izdelke, ki so polno funkcionalni in namenjeni dejanski rabi. Eno od področij razvoja materialov je tudi uporaba materialov naravnega izvora kot je npr. les. Lesni ostanki iz lesnopredelovalne industrije oziroma celo biomasa iz lignoceluloznih rastlin se lahko z ustrezno predelavo uporabijo pri različnih tehnikah 3D- tiskanja. Lesne ostanke se običajno zmelje v ustrezno velikost delcev/vlaken in nato uporabi kot polnilo ali pa ojačitveno sestavino materiala. Različna vlakna (steklena, karbonska) in delci (prah, tudi nanodelci) se že vključujejo v materiale za tiskanje, uporabne pri različnih tehnikah. V teh tehnikah bi lahko uporabili tudi lesni prah (ustrezne velikosti delcev), oziroma lesna vlakna ali pa še manjše gradnike lesa: celulozo, lignin, nanocelulozo.

Poleg ostalih dobrih lastnosti pa je les tudi najcenejši med vsemi, tudi bolj tradicionalnimi polnili.

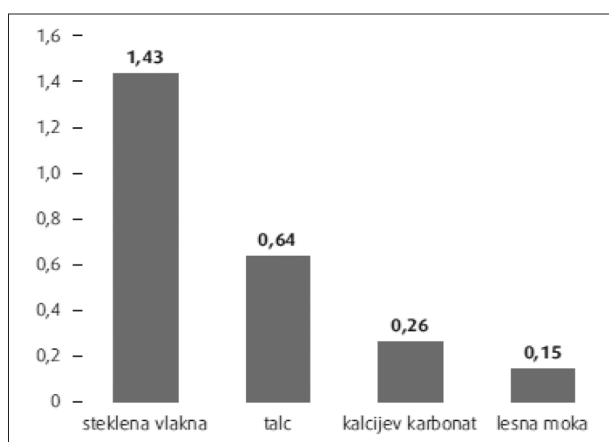
Na sliki 1 so prikazane cene za kilogram različnih polnil (Hančič, 2006).

Velik potencial uporabe lesa v sodobnih proizvodnih tehnologijah predstavljajo: (1) stereolitografija, (2) inkjet prašno tiskanje (3DP)/kapljično nanašanje/brizganje veziva, (3) nalaganje krojenih plasti, (4) modeliranje s spajanjem slojev (FDM) in (5) ekstrudiranje – brizganje materiala.

2.1 STEREOLOGRAFIJA (SLA)

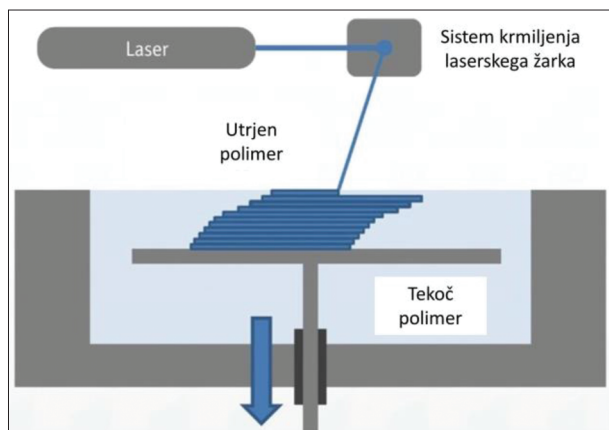
2.1 STEREOLOGRAPHY (SLA)

Tehnika SLA deluje na podlagi strjevanja tekočega fotopolimera s pomočjo zunanjega vira svet-



Slika 1. Cene polnil v polimernih kompozitih v €/kg (Hančič, 2006)

Figure 1. Prices of fillers in polymer composites (Hančič, 2006)



lobe. Delovna plošča se pomika navpično v kad s tekočim polimerom, tako da se na njej ustvari tanek sloj polimera. Vir svetlobe nad gladino polimera s pomočjo optičnih sistemov osvetli površino tekočega polimera na točno določenih mestih (prerezu izdelka) in s tem utrdi prerez izdelka v trenutnem sloju. Sledi spuščanje delovne plošče za debelino sloja, tekoči polimer preplavi novo plast in sledi osvetljevanje/utrdjevanje in sprejemanje sloja s predhodnim (Slika 2).

Ko je izdelek v celoti zgrajen, se plošča dvigne iz polimera in odcedi odvečen neutrjen polimer. Predmet je potrebno običajno še dodatno obdelati, očistiti in utrditi (Muck & Križanovskij, 2015). Polimeru je možno dodajati tudi različna vlakna za ojačanje strukture, npr. dodatek kratkih steklenih vlaken izboljša togost in natezno trdnost izdelkov (Cheah et al., 1999; Karalekas & Antoniou, 2004). Vlakna sicer blokirajo del svetlobe in je zato potrebno utrjevanje z večjo močjo oziroma daljšim časom, vendar so mehanske lastnosti boljše in krčenje izdelka po utrjevanju manjše.

2.2 KAPLJIČNO NANAŠANJE ALI BRIZGANJE

VEZIVA - INKJET PRAŠNO TISKANJE (3DP)

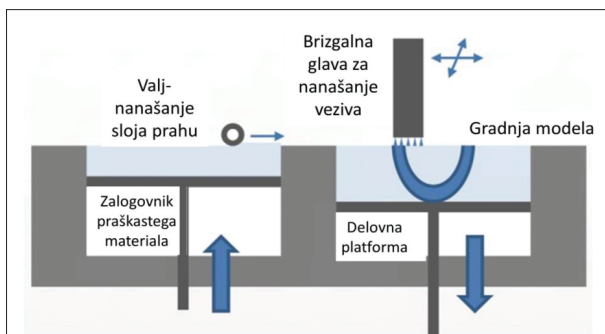
2.2 INDIRECT INKJET PRINTING (3DP)

Kapljično nanašanje ali brizganje veziva temelji na kapljičnem nanašanju veziva na praškast material. Tiskalnik je sestavljen iz kartuše z vezivom, delovne platforme, sistema za nanašanje sloja praškastega materiala v ustrezni debelini sloja ter zalogovnika praškastega materiala. Podajalnik (valj) nanese ustre-



Slika 2. Osnovni princip gradnje izdelka s stereolitografijo (Kim et al., 2016 – levo) in primer tiskalnika z obrnjeno gradnjo izdelka – platforma se pomika iz bazena smole – desno (Large build volume Solidator ..., 2013)

Figure 2. Left: the principle of building a product with stereolithography (Kim et al., 2016). Right: the example of a reversed building-printing platform moving upwards from a resin (Large build volume Solidator ..., 2013)



Slika 3. Princip delovanja kapljičnega nanašanja veziva na praškast material (Kim et al., 2016).

Figure 3. Principle of injection printing of the binder to the powder material (Kim et al., 2016)

zno debelino sloja praškastega materiala iz zalogovnika. Glava z vezivom kapljično nanese vezivo na ustrezna mesta in s tem poveže/utrdi material. Sledi spuščanje delovne platforme, nanos novega sloja praškastega materiala in brizganje veziva (Slika 3).

Tiskalnik lahko vsebuje tudi več kartuš z različno obarvanim vezivom in s tem omogoča barvno tiskanje, na podoben način kot pri običajnem 2D-tisku. Odvečen, neutrjen material, ki med tiskanjem služi tudi kot podpora pri tiskanju predmetov s previsi, se po tiskanju odstrani, natisnjen predmet pa je treba impregnirati s tekočo smolo, da zapolnimo pore in utrdimo površino (Muck & Križanovskij, 2015). Uporabljajo se praškasti materiali različne sestave npr.

Z-Corp tiskalniki uporabljajo mešanico mavca (50 %–95 %), vinil polimera (2 %–20 %) in sulfatne soli (do 5 %) ter ustreznega veziva. Uporabljajo se tudi mešanice naravnih sestavin npr. koruznega škroba, dekstrana, želatine (Lam et al., 2002), kalcijevega fosfata (Inzana et al., 2014), lesnega prahu, fino zmletega prahu iz lupin raznih oreščkov, kombinacije lesnega prahu in komercialnih praškastih materialov (Wahab et al., 2009). Lesni prah oziroma iveri so ena od možnosti, v kombinaciji z različnimi vezivi (Slika 4).

Lesni prah je lahko tudi pomešan z ustreznim vezivom (npr. mavec), ki ga nanašamo v slojih, ter nato na ustreznih mestih brizgamo z vezivom/vodo, odvisno od sestave praškaste faze (Slika 5).

Modele, narejene s takim postopkom, je seveda treba ustrezno obdelati, saj je površina porozna, zaradi česar ima slabše mehanske lastnosti. Običajno se impregnira s smolami ustrezne viskoznosti in nato utrdi. Henke & Treml (2013) sta v začetni raziskavi uporabila lesne iveri, namenjene za izdelavo ivernih plošč, ki sta jih zmešala z mavcem, cementom ali metil celulozo in nasula v posameznih slojih, ki sta jih popršila z vodo z dodatki (aktivatorji), da sta povzročila utrditev mavca/cementa. Trdnost je bila sicer nizka, v rangu izolacijskih plošč iz lesnih vlaken.

Wahab et al. (2009) pa so ugotovili, da dodatek lesnega prahu (do 50 %) komercialni mešanici za tiskanje (mešanica mavca, polimera in soli) izboljša natezne lastnosti izdelka.



Slika 4. Primeri izdelka organske oblike – 3D-tiskanje z lesnim prahom (Freedom Of Creation ..., 2011) – levo, replika maske, tiskana s kombinacijo lesnega prahu in komercialnih praškastih materialov (Woodn't You ..., 2011) – desno.

Figure 4. Example products. Left: 3D printing with wood dust (Freedom Of Creation..., 2011). Right: replica mask printed with a combination of wood dust and commercial powder materials (Woodn't You ..., 2011)



Slika 5. 3D-tiskanje z lesom s tehniko praškaste faze in brizganja veziva (Henke & Treml, 2013)

Figure 5. 3D printing with wood powder and binder injection (Henke & Treml, 2013)

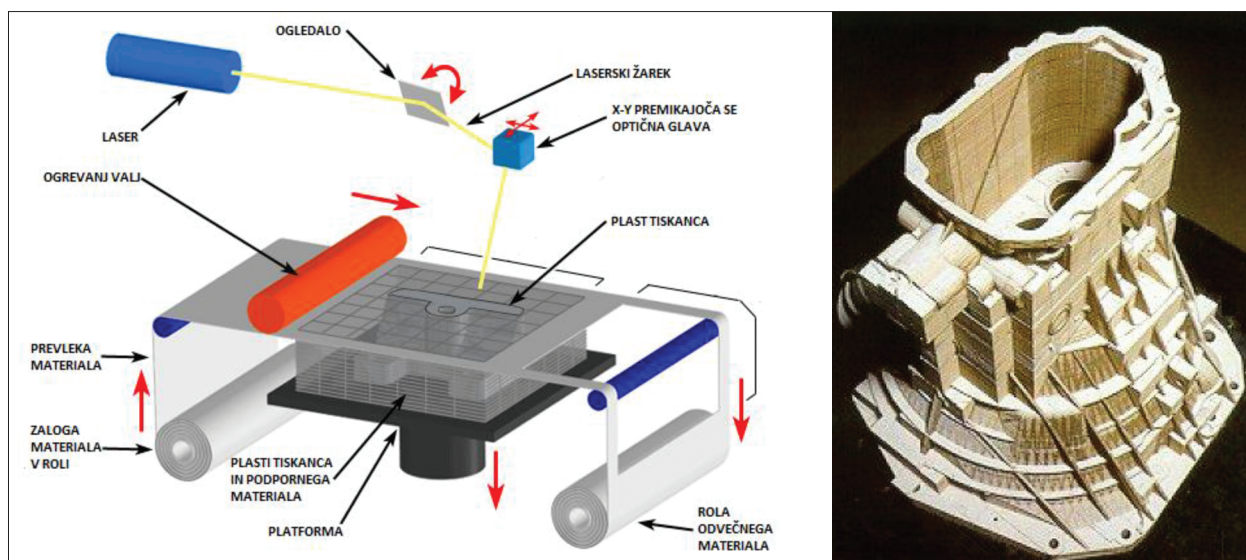
Z dodajanjem lesnega prahu se precej poveča hrapavost površine in trdnost modela, zmanjša pa se dimenzijska natančnost tiskanja in dimenzijska stabilnost modela, kateremu je vzrok sušenje in krčenje lesnega prahu po obdelavi oz. tisku.

2.3 NALAGANJE KROJENIH PLASTI (LOM)

2.3 LAMINATED OBJECT MANUFACTURING (LOM)

Pri tehniki nalaganja krojenih plasti material režemo v plasteh in ga sestavimo v celoten izdelek. Teh primernih materialov ni veliko na voljo; gre predvsem za cenovno ugodne folije iz umetnih mas, papirja, lepenske, folij na osnovi celuloznih vlaken. Pri gradnji modela se plast materiala položi na delovno ploščo,

se ustrezno spoji s predhodnim slojem (lepila ali pa taljenje z ogrevalnim valjem) ter odreže slojno obliko. Model se pomakne navzdol za debelino sloja in doda se nov sloj. Ves odvečni material se po koncu odstrani in se ga običajno zavrže. Material se reže z rezilom ali z laserskim žarkom, odvisno od naprave in materiala, ki ga uporabljamo (Slika 6). Natisnjeni objekti so sicer trdni, s površino, podobno prečnemu prerezu vezane plošče, vendar so uporabni predvsem za vizualne prototipe (Warnier, 2014). Tehnika je podobna nekoč precej uporabljeni izdelavi arhitekturnih maket – reliefov iz tankih slojev lesa, ki so se med seboj lepili, tako da obstaja tudi možnost uporabe furnirjev za gradnjo izdelka.



Slika 6. Princip delovanja nalaganja krojenih plasti (Custompartnet, povzeto po Žakelj, 2016) – levo, izgled konceptualnega izdelka – desno (Top 7 Methods ..., 2015)

Figure 6. Left: principles of laminated object manufacturing technology (Custompartnet, adapted by Žakelj, 2016). Right: image of the conceptual product (Top 7 Methods ..., 2015)

2.4 MODELIRANJE S SPAJANJEM SLOJEV/CILJNO NALAGANJE (FDM)

2.4 FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)

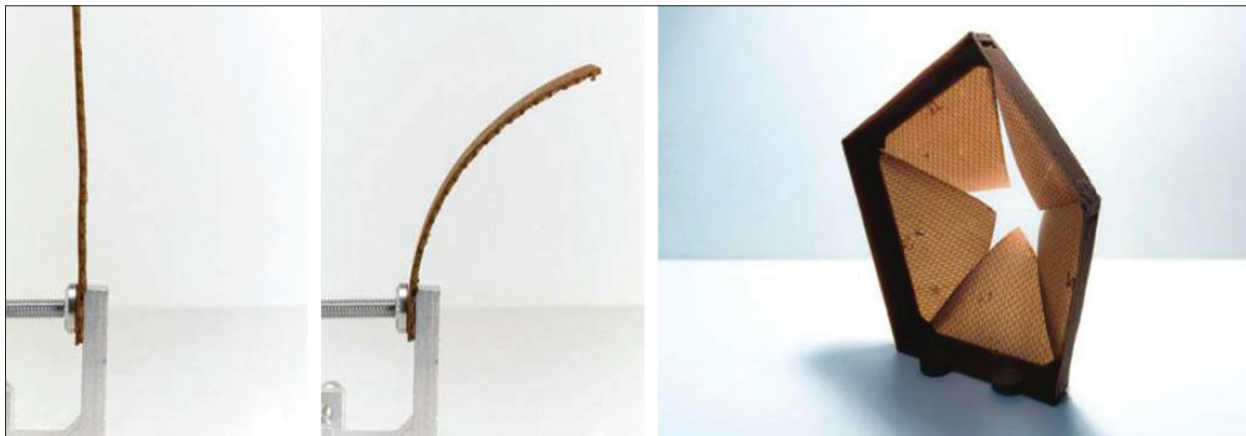
Tehnologija ekstrudiranja termoplastov je razmeroma enostavna tehnika in se najpogosteje uporablja predvsem pri odprtokodnih in cenejših tiskalnikih. Material se dovaja v ekstrudirno glavo, kjer se stali in skozi šobo nanese na delovno površino oz. sloj in tam utrdi. Pri predmetih zahtevnejših oblik je potrebno graditi tudi podporno strukturo, ki jo po tiskanju fizično odstranimo. Po vsakem novo nanesenem sloju se delovna plošča (ali pa ekstrudirna glava, odvisno od tipa tiskalnika) odmakne za debelino sloja in ponovno z ekstrudiranjem zapolnimo sloj modela. Staljen polimer pa se oprime predhodnega sloja in s tem se gradi izdelek (Muck & Križanovskij, 2015).

Uporaba lesa v kombinaciji s termoplastnimi polimeri je že dobro znana s področja lesno-plastičnih kompozitov. Lesno-plastični kompoziti so kompoziti, narejeni iz recikliranega oziroma novega polimera in lesnih delcev. Uporabljajo se termoplastični polimeri, ki se v ekstrudorju staliijo in zmešajo z lesnimi delci ter iztisnejo v različne oblike profilov in plošč. Pri tehniki brizganja v model oziroma iztisnivanja skozi matrico smo omejeni z obliko, medtem ko pri 3D-tiskanju lahko izdelamo poljubno obliko brez uporabe kalupov ali matric pri ekstrudiranju. Izdelki iz lesno-plastičnih kompozitov so namenjeni uporabi za zunanje talne obloge, ograje, fasadne obloge, obrobe, vratne in okenske profile, zunanje in notranje pohištvo, v zadnjem času tudi v

avtomobilski industriji kot notranje obloge, deli armaturnih plošč in v navtiki. Lesni delci so lahko dodani kot polnilo in s tem znižajo ceno kompozita, saj so lesni ostanki cenejši kot polimer, ali pa kot ojačevalna komponenta, ki izboljša mehanske lastnosti polimera. S pravo kombinacijo polimera, deležev posameznih komponent, dodatki, vrsto in obliko lesnih delcev (dolžino) lahko izdelamo kompozite z zelo različnimi materiali in lastnostmi (Kim & Pal, 2010; Olakanmi & Strydom, 2016).

Lesno-plastični kompoziti seveda obdržijo del lastnosti lesa kot je higroskopnost in s tem povezane dimenzijske spremembe, dovzetnost za glivni napad ... To lahko omilimo z ustreznimi dodatki ter zadostnim deležem polimera, ki prekrije površine lesnih delcev in jih s tem nekoliko zaščitimo pred vlaženjem. Za doseganje dobrega oblepljanja lesa s polimeri ter s tem tudi boljše mehanske lastnosti kompozita je treba uporabiti dodatke, saj se običajno polimeri zaradi svoje hidrofobnosti površine slabo oprijemajo na hidrofilno površino lesnih delcev (Adhikary et al., 2008; Kim & Pal, 2010).

Dimenzijske spremembe zaradi spreminjanja vlažnosti lahko tudi funkcionalno uporabimo npr. za izdelavo pametnih materialov, ki pri spremembi klime spreminjajo obliko (Le Duigou et al., 2016) (Slika 7). Elementi, natisnjeni s sloji z različnimi deleži lesa, se pri spreminjanju vlažnosti okolice ukrivljajo in bi lahko služili kot aktivne komponente npr. za nosilce sončnih celic, lopute prezračevanja itd. (Rüggeberg & Burgert, 2015; Le Duigou et al., 2016).

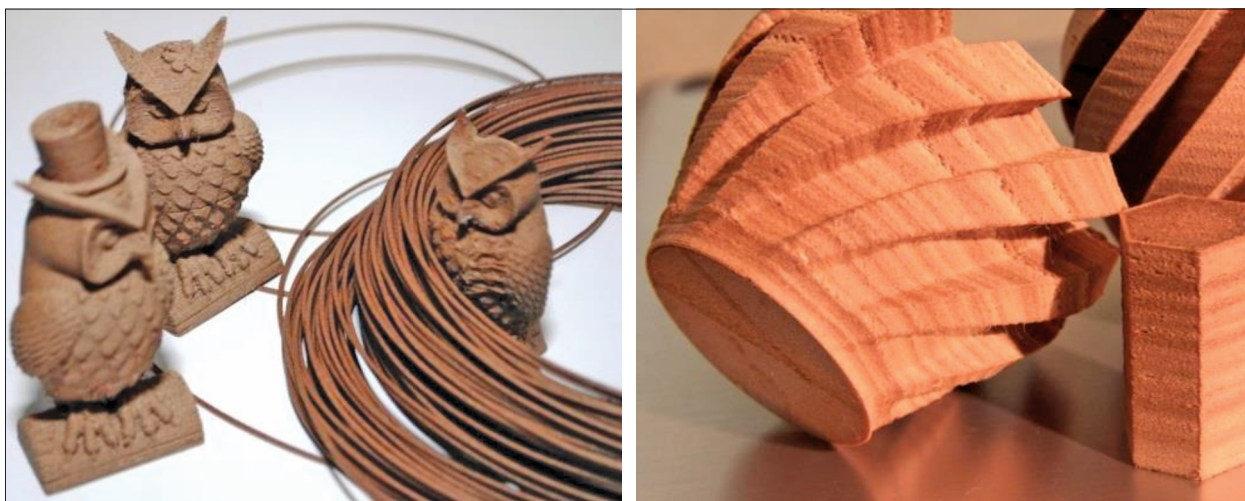


Slika 7. Ukrivljanje 3D-tiskanega elementa z lesnimi delci s sloji z različno strukturo pri spremembi klime – levo in primer uporabe za »prezračevalno odprtino« – desno (Correa et al., 2015).

Figure 7. Right: bending of a 3D-printed element made of wood particles due to a change in climate. Left: example of using of this feature for a ventilation opening (Correa et al., 2015).

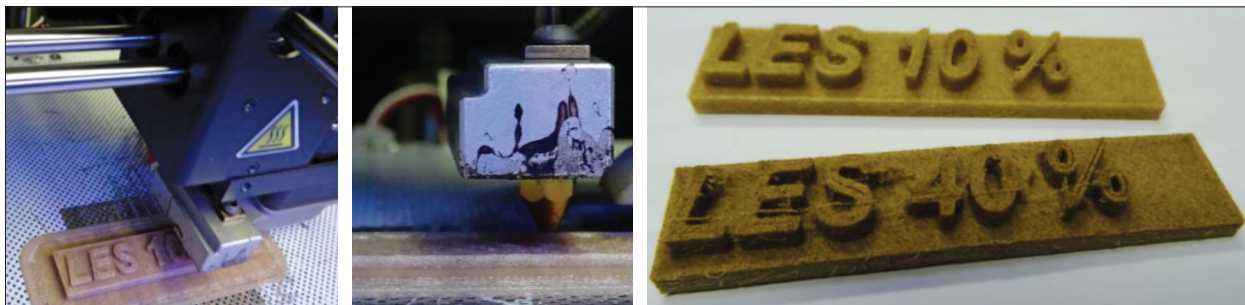
Med različnimi 3D-tehnikami je les najbolj uporaben pri FDM tehniki (Tao et al., 2017). Na trgu so filamenti različnih proizvajalcev z različnimi deleži lesa (npr. Laywoo-d3). Les je v tem primeru najpogostejše polnilo, saj je primešan termoplastičnemu polimeru v fazi izdelave filamenta, vendar tudi delno spremeni lastnosti izdelkov (Tao et al., 2017). Zaradi značilnosti tehnike - iztiskanja skozi šobo, morajo biti delci lesa v filamentu ustrezne velikosti (prah), da ne pride do mašenja šobe (premer odprtine šobe je običajno 0,2 mm – 0,8 mm). Večinoma je v filamentih do 40 % lesa, večji deleži že predstavljajo možnost mašenja šob, staljeni polimeri z večjim deležem imajo previsoko viskoznost za ekstrudiranje na obstoječih 3D-tiskalnikih in filamenti z večjim deležem lesa so bolj krhki (Slika 8).

FDM tehnika je z ustrezno opremo primerna tudi za tisk večjih izdelkov. Horta et al., (2017) so na robotsko roko pritrdili prirejen ekstrudor, ki z mešanico odpadnega HDPE in žagovine lahko tiska tudi večje izdelke. Podobni sistemi z različnimi tehnikami tiska in krmiljenja tiskalne glave npr. tiskanje s poliuretansko peno (Barnett & Gosselin, 2015) s posebno ekstrudirno glavo, obešeno in krmiljeno preko kablov (ang. cable driven robot), tiskanje keramike, gline, mešanice betona (Khoshnevis, 2004), nakazujejo tudi možne uporabe v gradbeništvu oziroma za gradnjo večjih izdelkov, npr. manjših bivalnih enot, gradnjo začasnih bivališč po naravnih katastrofah, celo možnosti gradnje objektov na novih planetih, kot npr. koncept projekta Building lunar base, ki je bil potrjen s strani European Space Agency (Building a lunar base with 3D printing, 2013).



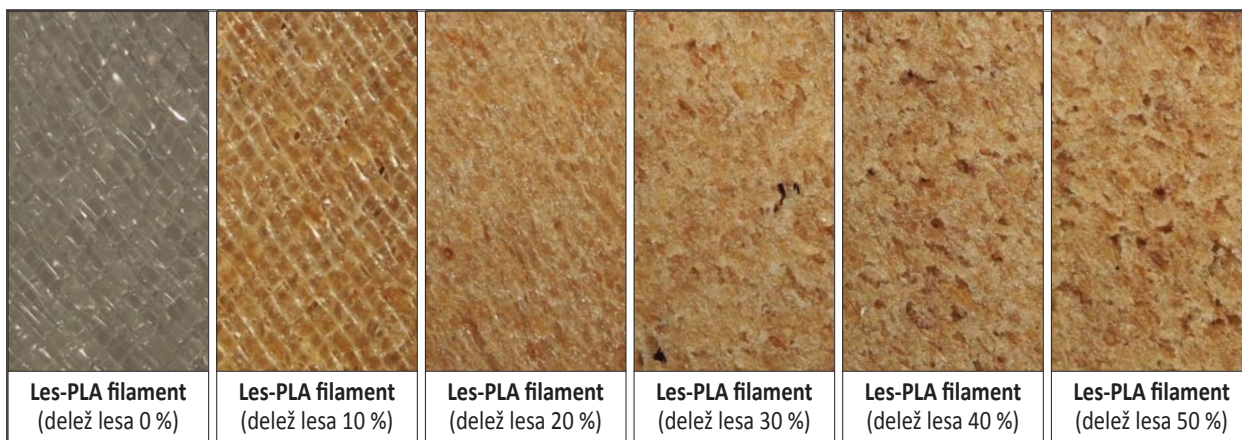
Slika 8. Laywoo-d3 filament s 40% lesa (What Material ..., 2014) – levo in videz »letnic« lesa pri uporabi lesno-plastičnih filamentov in variiranju temperature pri tiskanju (Shades of brown ..., 2012) – desno.

Figure 8. Left: Laywoo-d3 filament with 40% wood (What Material..., 2014). Right: the “wood texture” appearance of a product made from wood-plastic filaments and the use of temperature variations during printing (Shades of Brown ..., 2012).



Slika 9. FDM tehnika 3D-tiskanja s PLA filamenti z do 40 % lesnega prahu (foto: Kariž M.)

Figure 9. FDM 3D-printing technique with PLA filaments with up to 40 % wood dust (photo: Kariž M.)



Slika 10. Videz površine izdelka, tiskanega s filamenti z različnimi deleži lesa (20-kratna povečava) (foto: Žigon, J.)

Figure 10. Appearance of the surface of the product printed with filaments with different wood contents (20x magnification) (photo: Žigon, J.)

Uporaba lesa tudi omejuje uporabo polimerov, le-ti morajo biti kompatibilni z lesom, uporabni so polimeri z nižjim tališčem, saj sicer pri višjih temperaturah pri tiskanju prihaja do obarvanja lesne komponente. Zaradi ustrezne temperature tiskanja (cca med 200 °C in 230 °C, priporoča se 195 °C) se zato največ uporablja PLA polimer. Z variiranjem temperature lahko sicer tudi vplivamo na spremembo barve lesa in dosežemo vizualen izgled »letnic« lesa (Slika 9).

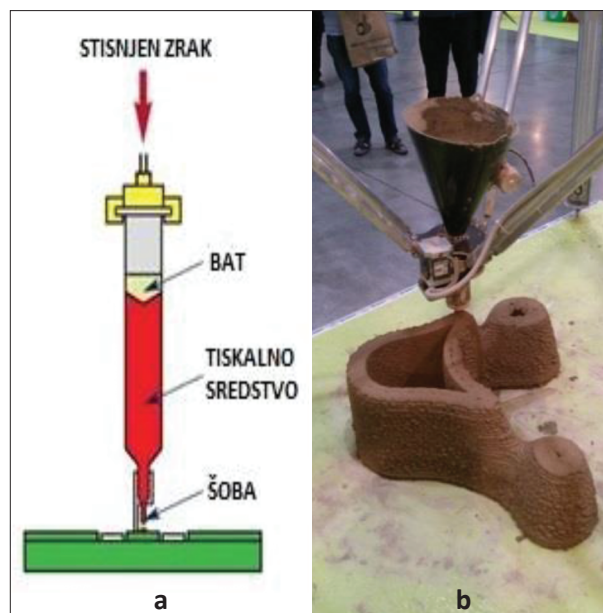
Površina izdelkov, narejenih s filamenti z vsebnostjo lesnega prahu, je hrapava, podobna vlaknenim ploščam in običajno potrebuje obdelavo – brušenje. Pri večjih deležih lesa lahko pride do mašenja šobe in neenakomernega/prekinjenega ekstrudiranja in s tem porozne površine (Slika 10).

2.5 EKSTRUDIRANJE MATERIALA

2.5 MATERIAL EXTRUSION

V svetu se je najprej razvila predvsem industrija ekstrudiranja polimerov, medtem ko je bila tehnologija ekstrudiranja biopolimerov zaradi raznih težav zapostavljena, kar pa se v zadnjih letih spreminja. Ekstrudiranje ali iztiskovanje materiala je v osnovi zelo podobno tehniki FDM tiskanja – pri obeh tehnikah se material ekstrudira skozi šobo na delovno površino sloj za slojem. Razlika je v materialih ter sami tehniki ekstrudiranja, predvsem tu ni taljenja polimera, ampak gre za ekstrudiranje mešanic z viskoznostjo, podobno pastam. Potrebno silo za ekstrudiranje zagotavljamo s pritiskom zraka ali s pomočjo

pritisnega bata za materialom. Uporabljeni so materiali ustrezne viskoznosti, ki se z lahkoto plastično preoblikujejo in nato utrdijo s pomočjo zraka, sušenja ali pa povišane temperature (Slika 11).



Slika 11. Shema sistema na osnovi ekstrudiranja: a) ekstrudiranje preko pritiska zraka (Initial extruder ..., 2013), b) oziroma preko ekstrudirne glave z vijačnim transporterjem (WASP ..., 2015)

Figure 11. Schematic of an extrusion-based system: a) with air pressure driven extrusion (Initial extruder ..., 2013), b) with an extruder head and screw conveyor (WASP ..., 2015)

Tiskanje z mešanico lesnega prahu in tekočega polimera oz. lepila je podobna 3D-tiskanju keramike ali gline in podobnih past, npr. čokolade v prehranjevalni industriji (Kariž et al., 2016; Pitt et al., 2017). Tehnika bi sicer omogočala enostavnejšo uporabo ostankov- npr. samo mletje, oziroma celo uporaba direktnih ostankov žagovine, brusnega prahu, ki bi se v tiskalni glavi zmešali z lepilom, vendar je zaradi počasnejšega utrjevanja tekočih smol tudi počasnejša. Pred nanašanjem naslednjega sloja mora biti predhodni sloj dovolj utrjen, sicer pride od poseda nja strukture (Slika 12).

Tudi posamezne komponente lesa predstavljajo zanimivo opcijo za 3D-tiskanje, vendar je potrebno več obdelave lesnih ostankov in uporaba prilagojenih metod tiskanja. Npr. izdelki, natisnjeni z acetatom celuloze, raztopljenim v acetonu, ki po tiskanju izhlapi, so pokazali upogibno trdnost primerljivo z izdelki, tiskanimi iz ABS polimera (sicer s FDM tehnologijo) (Pattinson & Hart, 2017). Še bolj obetajoča je uporaba nanoceluloze kot ojačitvenega dodatka k že znanim tehnikam in materialom. Kumar et al., (2012) so že s primešanim 5 % dodatkom celuloznih nanokristalov optično utrujujočim smolam za stereolitografijo dosegli izboljšanje modula elastičnosti in natezne trdnosti v trdnem stanju za 57 %, ne da bi vplivali na sam način uporabe smole. 30 % dodatek

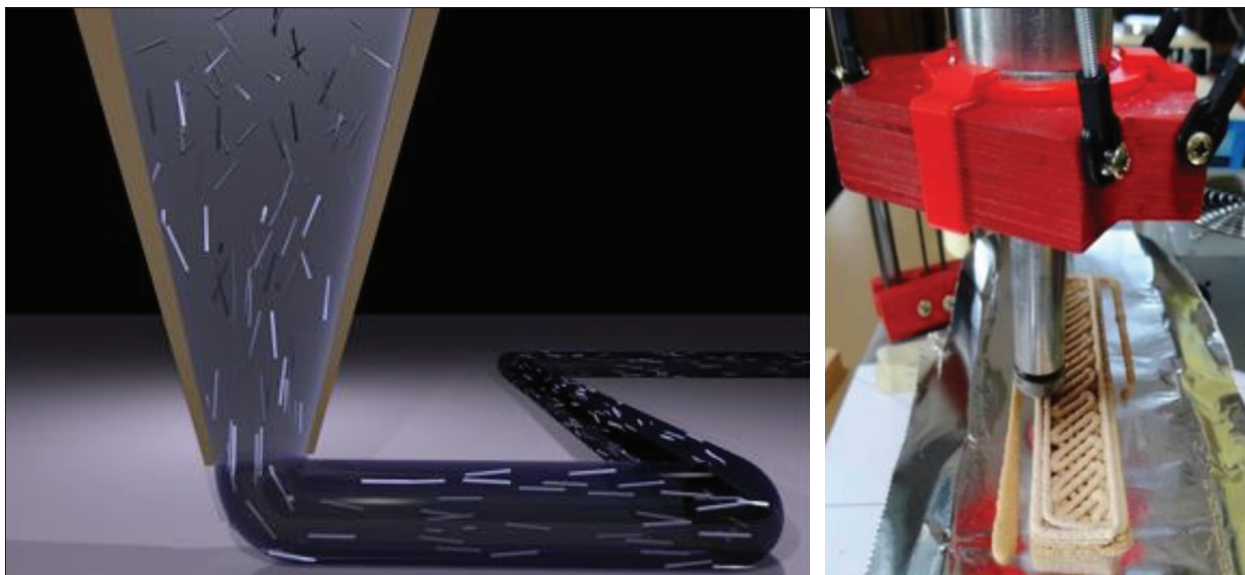
nanoceluloznih fibril je tako za 3,6-krat izboljšal modul elastičnosti PLA materiala, ki se veliko uporablja v FDM tehniki tiskanja (Žepič et al., 2016), tiskanje pa je mogoče tudi s nanoceluloznimi hidrogeli (Pinomaa 2016; Leppiniemi et al., 2017).

3 ZAKLJUČKI

3 CONCLUSIONS

Dodajalne tehnologije imajo seveda tudi nekatere pomanjkljivosti, ki so odvisne od tehnike in izbranega materiala. Predvsem so izdelki trenutno omejeni z velikostjo tiskanja, saj so na trgu predvsem komercialni tiskalniki, ki omogočajo tiskanje predmetov velikost približno 20 cm × 20 cm × 20 cm. Pri izdelkih, kjer želimo večjo resolucijo tiska in s tem boljšo površino, moramo tiskati v tanjših slojih, kar pomeni počasno in s tem tudi dražjo izdelavo. Površina izdelkov običajno potrebuje še dodatno obdelavo, odvisno od izbrane resolucije tiska in tehnike tiskanja (npr. kitanje, brušenje, površinski premazi, impregnacija s smolo ...).

Industrijski 3D-tiskalniki pa že lahko tiskajo modele v velikosti nekaj metrov in vse do modelov velikosti hiše. Nizozemski arhitekti so tako npr. začeli z gradnjo 3D objekta Canal House v Amsterdamu (<http://3dprintcanalhouse.com/>). Ti tiskalniki omogočajo tiskanje izdelkov v zelo veliki resoluciji, kvali-



Slika 12. Uporaba tehnike ekstrudiranja mešanice lesa in veziva pastozne viskoznosti. Usmerjena vlakna v ekstrudiranem materialu – levo (Compton & Lewis, 2014) – levo, in ekstrudiranje (Kariž et al., 2016) – desno.
Figure 12. Use of the extrusion technique for a viscous paste mixture of wood and binder Left: directional fibres in extruded material (Compton and Lewis, 2014). Right: the extrusion process (Kariž et al., 2016)

teti površine in uporabljajo zelo obstojne materiale - npr. beton (Slika 13).

Pomembno je poznati tudi omejitve dodajalnih tehnologij. Zaradi slojevite gradnje je tudi trdnost izdelkov manjša. Izredno je pomembna kakovost zlepljenosti posameznih slojev, sicer lahko pri obremenitvi pride do razslojevanja. Zato so pomembni parametri tiskanja in lastnosti materialov. Material mora pred nanosom naslednjega sloja dovolj utrditi, da ne pride do posedanja materiala ob obremenitvi z maso naslednjega sloja, vendar hkrati ostati dovolj lepljiv, da se zlepi z novim slojem. Med sloji lahko nastanejo tudi določene napetosti zaradi krčenja/nabrekanja slojev ob utrjevanju, npr. napetosti pri ohlajanju staljenih polimerov pri FDM tehniki in s tem krivljenje izdelkov.

Uporaba lesnih ostankov z ustrezno predelavo v postopkih 3D-tiskanja predstavlja eno od možnosti uporabe lesnih ostankov in dodajanja vrednosti tem ostankom. Za optimalne lastnosti končnih izdelkov moramo lesne ostanke ustrezno obdelati in porabiti na primernih tehnologijah in mestih uporabe, da bi dosegli optimalne rezultate. Na tem področju je potrebnih še precej raziskav, da bi lahko porabili večje količine lesa in razvili nova področja uporabe v npr. arhitekturi, aeronavtiki ... Veliko možnosti obstaja tudi pri uporabi recikliranega lesa, gradbenih ostankov v povezavi z odpadno plastiko. Potrebno je najti metode, kako uporabiti npr. odpadne materiale oziroma reciklirati odpadke/ostanke, kjer bi z majhnimi vložki dobili funkcionalne izdelke. Trenutno bi bilo

mogoče 3D-tiskanje uporabiti npr. za izdelavo posamezniku prilagojenih, personaliziranih, kompleksnejših izdelkov z višjo stopnjo funkcionalnosti in oblikovalskim presežkom. Npr. individualno prilagojena embalaža posebnih oblik, kot osnova pohištva organskih oblik, ki je npr. še tapecirano, za izdelavo kalupov, šablon pri izdelavi pohištva, kot osnovo, ki se jo potem oplašča z bolj odpornimi materiali itd., vendar je treba še razviti ustrezno proizvodno tehnologijo. S 3D-tiskanjem je mogoče izdelati spojnike, s katerimi bi spojili običajne lesene elemente v pohištvo (Grujovic et al., 2017). 3D-tiskanje pa se uveljavlja tudi kot alternativa izdelavi montažnih hiš. Možnosti 3D-tiska in njegove prednosti je potrebno predstaviti končnemu uporabniku. Smiselno bi bilo tudi vlagati v nadaljnje raziskave novih biopolimernih materialov, ki bi po svojih strukturnih zmogljivostih bili celo primerljivi z visokotrdnostnimi kompoziti iz steklenih vlaken.

4 POVZETEK

4 SUMMARY

Additive manufacturing has seen rapid development in the last few years and been applied in many areas, with its use increasing in both industrial manufacturing and among hobbyists. In particular, the field home 3D printing is evolving with the emergence of more affordable and quality printers. Beside printers and printing technologies, another important area is material development. Current re-



a



b

Slika 13. Primeri 3D-natisnjenih objektov: a) Urban Cabin (Koslow, 2017), b) »Office of the Future« Dubai (Augur, 2016).

Figure 13. Examples of 3D printed buildings: a) Urban Cabin (Koslow, 2017), b) "Office of the Future" Dubai (Augur, 2016).

search is aimed at producing new materials with better performance, but also lower price, without the use of harmful substances and with the use of recycled and natural materials, and with a low carbon footprint.

Wood has potential for use in various 3D-printing materials. Wood and its residues can be used in several forms, from sawdust or particles of different sizes, to elements that are further machined, such as fibres, cellulose, and nanocellulose, or even just partial components, like lignin. Depending on the particle size, form factor and type of composite, wood can be used as a filler or reinforcement with selected polymers to form wood plastic composite printing materials.

Several additive manufacturing technologies are available and commercially used, but not all are appropriate to use with wood particles. The most suitable are stereolithography (SLA), indirect inkjet printing (3DP), laminated object manufacturing (LOM), fused deposition modelling (FDM), and material extrusion/contour crafting, with wood or similar particles already being used with these approaches.

In stereolithography, wood particles or fibres can be added to UV/laser curing liquid polymer to reinforce the cured material and improve the modulus of elasticity and tensile strength. For indirect inkjet printing (3DP), wood particles/powder can be added to or even used to replace commercial powder printing material (usually a mixture of plaster, vinyl polymer and sulphate salt). Liquid binder, which is injected on a layer of powder printing material during printing, must be modified to bond wood particles and other components of the material, while veneer could be used in laminated object manufacturing, similar to the method used with current polymer foils. Moreover, wood powder or small particles can be mixed with commercial liquid adhesives/resins to form pastes which can then be used with material extrusion/contour crafting techniques to 3D print objects.

Most wood is now used in the form of FDM. Wood powder can be mixed with selected polymers (ABS, PLA) and extruded in the form of filaments, and the resulting 3D printing filaments can then be used in FDM 3D printers, where the filament melts in the hot printer head, extrudes through the printing nozzle and deposits on selected areas in each layer. Com-

mercial filaments with different polymers and ratios of wood are now available on the market.

Wood in combination with polymers can be used to 3D print personalized items and small series, unique products, as well as to make organic shapes for use in furniture, moulds, and connectors for furniture, or even in the construction industry to produce wooden houses.

The wood in these wood-plastic composites retains some of its original properties, including hygroscopicity and associated dimensional changes, and these should be considered when designing 3D-printed parts. Moreover, these weaknesses can be also used as advantages when designing elements that change shape in different climate conditions, thus producing so-called smart materials (for use in ventilation openings and the like).

Overall, wood is a promising material for use in 3D printing, but further research needs to be done to improve existing technologies and materials to increase its use and the added value of wood residues. The future holds great promise for 3D printing as a technology, and for the end users of the related products.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENTS

Pripravek je pripravljen v okviru dela programske skupine P4-0015, ki jo financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost republike Slovenije (ARRS) in bilateralnega projekta BI-BA-JR /2015/47 (2016/2017) Lastnosti lesnih materialov in lepil za 3D-tehnologijo tiskanja / Properties of wood materials and adhesives for 3D printing technology, ki ga financira ARRS.

LITERATURA IN VIRI

LITERATURE

- Adhikary, K. B., Pang, S., & Staiger, M. P. (2008). Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). *Composites Part B: Engineering*, 39(5), 807-815.
- Augur, H. (2016). 3D Printed Office Building Unveiled in Dubai. Retrieved from: <https://all3dp.com/3d-printed-office-building> (1.9.2017).
- Barnett, E., & Gosselin, C. (2015). Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot. *Additive Manufacturing*, 7, 27-44.

- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 5, 155-162.
- Building a lunar base with 3D printing (2013). European space agency. Retrieved from: http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing (18.9.2017).
- Compton, B. G., & Lewis, J. A. (2014). 3D-printing of lightweight cellular composites. *Advanced materials*, 26(34), 5930-5935.
- Conner, B. P., Manogharan, G. P., Martof A. N., Rodomsky, L. M., Rodomsky, C. M., Jordan, D. C., & Limperos, J. W. (2014). Making sense of 3-D printing: creating a map of additive manufacturing products and services. *Additive Manufacturing*, 1-4, 64-76.
- Correa, D., Papadopoulou, A., Guberan, C., Jhaveri, N., Reichert, S., Menges, A., & Tibbits, S. (2015). 3D-Printed Wood: Programming Hygroscopic Material Transformations. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2(3), 106-116.
- Cheah, C. M., Fuh, J. Y. H., Nee, A. Y. C., & Lu, L. (1999). Mechanical characteristics of fiber-filled photo-polymer used in stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*, 5(3), 112-119.
- Freedom Of Creation develops Tree-D Printing in Wood. (2011). Retrieved from: <https://www.3Dsystems.com/blog/foc/freedom-of-creation-develops-tree-d-printing> (1.9.2017).
- Glavičič, A. (2014). *Zgodovina 3D tiska*. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Naravoslovno tehnična fakulteta, Oddelek za tekstilstvo.
- Grujovic, N., Zivic, F., Zivkovic, M., Slijivic, M., Radovanovic, A., Bukvic, L., ... & Sindjelic, A. (2017). Custom design of furniture elements by fused filament fabrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 231(1), 88-95.
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., ... & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65-89.
- Google Insights for Search »3D printing« term, <https://trends.google.com/trends/explore?q=3D%20printing>
- Hančič, A. (2006). Brizganje biopolimernih kompozitov. *PlastForma*, 11(1), 24-26.
- Henke, K., & Treml, S. (2013). Wood based bulk material in 3D printing processes for applications in construction. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(1), 139-141.
- Horta, J. F., Simões, F. J. P., & Mateus, A. (2017). Large scale additive manufacturing of eco-composites. *International Journal of Material Forming*, 1-6.
- Initial Extruder Design (2013). University of Notre Dame . Retrieved from: <https://sites.nd.edu/3dp/2013/08/12/initial-extruder-design/> (1.9.2017).
- Inzana, J. A., Olvera, D., Fuller, S. M., Kelly, J. P., Graeve, O. A., Schwarz, E. M., ... & Awad, H. A. (2014). 3D printing of composite calcium phosphate and collagen scaffolds for bone regeneration. *Biomaterials*, 35(13), 4026-4034.
- Kariž, M., Šernek, M., & Kuzman, Kitek M. (2016). Use of wood powder and adhesive as a mixture for 3D printing. *European journal of wood and wood products*, 74(1), 123-126.
- Karalekas, D., & Antoniou, K. (2004). Composite rapid prototyping: overcoming the drawback of poor mechanical properties. *Journal of materials processing technology*, 153, 526-530.
- Kumar, S., Hofmann, M., Steinmann, B., Foster, E. J., & Weder, C. (2012). Reinforcement of stereolithographic resins for rapid prototyping with cellulose nanocrystals. *ACS applied materials & interfaces*, 4(10), 5399-5407.
- Kroll, E., & Artzi, D. (2011). Enhancing aerospace engineering students' learning with 3D printing wind-tunnel models. *Rapid Prototyp J*, 17(5)393-402.
- Kim, J. K., & Pal, K. (2010). Recent advances in the processing of wood-plastic composites. Springer Science & Business Media.
- Kim, G. B., Lee, S., Kim, H., Yang, D. H., Kim, Y. H., Kyung, Y. S., ... & Kwon, S. U. (2016). Three-dimensional printing: basic principles and applications in medicine and radiology. *Korean journal of radiology*, 17(2), 182-197.
- Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *Automation in construction*, 13(1), 5-19.
- Koslow, T. (2017). 3D Printed House – World's 35 Greatest 3D Printed Structures. Retrieved from: <https://all3dp.com/1/3d-printed-house-homes-buildings-3d-printing-construction/#urban-cabin> (1.9.2017).
- Lam, C. X. F., Mo, X. M., Teoh, S. H., & Hutmacher, D. W. (2002). Scaffold development using 3D printing with a starch-based polymer. *Materials Science and Engineering: C*, 20(1), 49-56.
- Large build volume Solidator DLP desktop 3D printer unveiled on Kickstarter (2013). Retrieved from: <http://www.3Ders.org/articles/20131210-large-build-volume-solidator-dlp-desktop-3d-printer-unveiled-on-kickstarter.html> (1.9.2017).
- Leppiniemi, J., Lahtinen, P., Paajanen, A., Mahlberg, R., Metsä-Kortelainen, S., Pinomaa, T., ... & Hytönen, V. P. (2017). 3D-Printable Bioactivated Nanocellulose–Alginate Hydrogels. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(26), 21959-21970.
- Le Duigou, A., Castro, M., Bevan, R., & Martin, N. (2016). 3D printing of wood fibre biocomposites: from mechanical to actuation functionality. *Materials & Design*, 96, 106-114.
- Muck, D., & Križanovskij, I. (2015). 3D-tisk. Pasadena.
- Nigro, S., (2016). Three Ways To Reinvent For The Fourth Industrial Revolution. *Forbes*. Retrieved from: <https://www.forbes.com/sites/hpinc/2016/12/07/three-ways-to-reinvent-for-the-fourth-industrial-revolution/#3528c58a2091> (2.9.2017)
- Nigro, S. (2017). The Fourth Industrial Revolution and you. Retrieved from: <https://newsblog.ext.hp.com/t5/HP-newsroom-blog/The-Fourth-Industrial-Revolution-and-you/ba-p/775> (1.9.2017).
- Olakanmi, E. O., & Strydom, M. J. (2016). Critical materials and processing challenges affecting the interface and functional performance of wood polymer composites (WPCs). *Materials Chemistry and Physics*, 171: 290-302.
- Pattinson, S. W., & Hart, A. J. (2017). Additive manufacturing of cellulosic materials with robust mechanics and antimicrobial functionality. *Advanced Materials Technologies*, 2(4).
- Pinomaa, T. (2016). Modelling the 3D printing of nanocellulose hydrogels. VTT Technical Research Centre of Finland. Retrieved

- from: http://www.vttresearch.com/Documents/Factory%20of%20the%20future/3D%20printing/3Pinomaa_Slides.pdf (1.9.2017).
- Pitt, K., Lopez-Botello, O., Lafferty, A. D., Todd, I., & Mumtaz, K. (2017). Investigation into the material properties of wooden composite structures with in-situ fibre reinforcement using additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 138, 32-39.
- Rüggeberg, M., & Burgert, I. (2015). Bio-inspired wooden actuators for large scale applications. *PloS one*, 10(4), e0120718.
- Shades of brown with wood filament, via varying temperature. (2012). Retrieved from: <http://www.tridimake.com/2012/10/shades-of-brown-with-wood-filament-via.html> (1.9.2017).
- Short, D. B. (2015). Use of 3D printing by museums: educational exhibits, artifact education, and artifact restoration. *3D Print Addit Manuf.*, 2(4):209e15.
- Tao, Y., Wang, H., Li, Z., et al., (2017). Development and Application of Wood Flour-Filled Polylactic Acid Composite Filament for 3D Printing. *Materials*, 10(4), 339.
- Top 7 Methods For Making 3D Rapid Prototypes (2015). *Star Rapid*. Retrieved from: <https://www.starrapid.com/blog/top-7-methods-for-making-3d-rapid-prototypes/> (1.9.2017)
- The Free Beginner's Guide (2017). 3D printing industry. Retrieved from: <https://3Dprintingindustry.com/3D-printing-basics-free-beginners-guide#02-history> (14.9.17)
- Wahab, M. S., Wagiman, A., & Zuki, N. M. (2009). Rapid prototyping of wood-based material. In: *Proceedings of MUCEET2009 Malaysian Technical Universities Conference on Engineering and Technology*, June 20-22, 2009, MS Garden, Kuantan, Pahang, Malaysia.
- Warnier, C. (2014). *Printing Things. Visions and Essentials for 3D Printing*. Berlin. Gestalten: 256 p.
- Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110, 442-458.
- WASP Unveils Rotating Extruder (2015). Retrieved from: <https://www.3pintr.com/wasp-unveils-rotating-extruder-5027813/> (1.9.2017).
- What Material Should I Use For 3D Printing? – Advanced Materials Review #1 – BendLay, Laywoo-D3 and LayBrick (2014). Retrieved from: <http://3Dprintingforbeginners.com/3D-printing-materials-bendlay-laywood-laybrick/> (1.9.2017).
- Wimmer, R., Steyrer, B., Woess, J., Koddenberg, T., & Mundigler, N. (2015). 3D printing and wood. *Pro Ligno*, 11(4), 144-149.
- Woodn't You Know It – 3DP in wood (2011). Retrieved from: <https://depts.washington.edu/open3Dp/2011/04/woodnt-you-know-it-3Dp-in-wood/> (1.9.2017).
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 1-10. doi: <https://doi.org/10.5402/2012/208760>
- Žepič, V., Poljanšek, I., Oven, P., & Čop, M. (2016). COST-FP1105: Properties of PLA films reinforced with unmodified and acetylated freeze dried nanofibrillated cellulose. *Holzforschung*, 70(12), 1125-1134.

S projektom APPLAUSE od prepoznave do širše uporabe invazivnih rastlin z vključevanjem prebivalcev

Izr. prof. dr. Maks Merela in Denis Plavčak, mladi raziskovalec
Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Projekt APPLAUSE (*Alien PLAnt SpECies - from harmful to useful with citizens' led activities* / od škodljivih do uporabnih tujerodnih rastlin z aktivnim vključevanjem prebivalcev), je bil izbran na evropskem razpisu pobude Urban Innovative Action (UIA).

Skupno enajst partnerjev je zasnovalo model projekta APPLAUSE za celovit pregled lastnosti in primerno uporabo invazivnih rastlin, ki so čedalje bolj prisotne v našem okolju in nam izpodrivajo avtohtono rastje. Na razpis UIA je prispelo skupno 206 projektnih prijav iz 21 različnih držav Evropske unije, za financiranje pa je bilo izbranih 16 projektov. Evropska komisija UIA podpira inovativne pilotske projekte na področju trajnostnega urbanega razvoja, zato je v ta namen iz Evropskega sklada za regionalni razvoj namenila del sredstev lokalnim oblastem, ki bodo na nov način iskale rešitve dane tematike. Komisija je na izboru upoštevala stopnjo inovativnosti, kvaliteto partnerstva, merljivost rezultatov, možnost širitve rešitve na druga urbana območja in kakovost delovnega načrta projekta.



Slika 1. Veliki pajesen (*Ailanthus altissima*) kot pogosta invazivna rastlina

Ocenjena vrednost projekta APPLAUSE je okoli 5,2 mio EUR, sofinanciranje iz EU sredstev znaša nekaj več kot 4,1 mio EUR. Projekt bo trajal 3 leta in sicer od 1. novembra 2017 do 31. oktobra 2020.

Projekt v sklopu krožnega gospodarstva izpostavlja nerešena vprašanja glede ravnanja z invazivnimi tujerodnimi rastlinami v smislu zero-waste pristopa. V pilotnem projektu predelave japonskega dresnika v papir so že dokazali, da je tovrstno surovino mogoče izkoriščati veliko bolj racionalno kot zgolj za sežig. Tako se v okviru projekta predlaga sistem ravnanja s tujerodnimi invazivnimi rastlinami, ki temelji na izobraževanju in sodelovanju prebivalcev Ljubljane po treh principih delovanja: »Naredi sam«, »Predelaj z nami« in »Oddaj v zbirnem centru«.

Poleg prijavitelja (Mestne občine Ljubljana) in Biotehniške fakultete (Oddelek za lesarstvo, Odd. za biologijo, Odd. za agronomijo in Odd. za gozdarstvo) sodelujejo še Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo; Naravoslovnotehniška fakulteta, Kemijski inštitut, javno podjetje Snaga, Institut Jožef Stefan, Inštitut za celulozo in papir, Tisa d. o. o., GD GIS-DATA d. o. o., društvo Trajna, Zavod tipoRenesansa in Center odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije.

Oddelek za lesarstvo ima ključno vlogo pri raziskavah zgradbe in relevantnih lastnosti olesenelih tujerodnih rastlin, sodeluje pri razvoju, projektiranju in trženju novih izdelkov, izdelovanju prototipov in končnih izdelkov ter razvoju novih pilotnih produktov iz ostankov v lesnopredelovalni verigi. Oddelek s podjetjem Snaga sodeluje tudi pri projektiranju in pripravi lesnoobdelovalne (mizarske) delavnice.

Celoten projekt je v osnovi oblikovan in zastavljen zeleno in inovativno, kar pomeni, da bo model prenosljiv na nova mednarodna območja oziroma okolja, pri čemer bodo omogočena nova delovna mesta, nova znanja in vključevanje težje zaposljivih ljudi z različnimi oviranostmi. V centrih ponovne uporabe bi se izvajale različne spretnostne in rokodelske delavnice s ciljemohranjati in razvijati tradicionalno obrt, kulturno dediščino ter znanje. ●

Srečanje ALUMNI kluba Oddelka za lesarstvo

Katarina Čufar, Vodja ALUMNI kluba
Boštjan Lesar, Predsednik Društva lesarjev Slovenije

Na Oddelku za lesarstvo smo imeli 16. 11. 2017 že 10. srečanje ALUMNI kluba. Srečanja se je udeležilo preko 120 udeležencev. Po zboru na oddelku, ogledu laboratorijev in kulturnem programu z nastopom zbora Barje, kjer pojeta 2 člana našega kluba, se je začel uradni program. Udeležence so nagovorili dekan Biotehniške fakultete prof. dr. Miha Humar, prodekan Oddelka za lesarstvo prof. dr. Milan Šernek, predsednik Društva lesarjev Slovenije doc. dr. Boštjan Lesar in vodja ALUMNI kluba prof. dr. Katarina Čufar. Letošnji sponzor srečanja je bilo družinsko podjetje SILVAAPIS d.o.o., ki ima kar štiri člane ALUMNI kluba. Silvana in Franc Šivic sta diplomanta 11. in 13. generacije gozdarjev / lesarjev, sin in hči Matjaž Šivic, univ. dipl. ing. les., mag. ekonomije in Alenka Šivic, univ. dipl. ing. les. pa sta diplomirala na univerzitetnem študiju lesarstva leta 1995

in 1997. Alenka Šivic je predstavila podjetje, kjer sta z bratom soustanovitelja in solastnika. Matjaž Šivic je predstavil svojo knjigo z naslovom *The Golden Tree*, ki je izšla v novembru 2017. Z nami je delil glavna sporočila knjige, kjer je opisal svojo strokovno pot in kako uspeti v poslu, povezanim z lesom.

Na srečanju so se predstavile tudi generacije lesarjev, ki so diplomirali pred 40, 30, 20 in 10 leti. Generacijo 1977 je predstavil Bine Kladnik, univ. dipl. inž. les. Generacijo 1982-1987 je zastopalo kar 15 udeležencev, ki so obudili spomin na dogodivščine, ki so jih doživeli kot študenti pred več kot 30 leti in predstavili svojo poklicno pot. Nato so se nam predstavile še skupine tistih, ki so diplomirali pred 20 in 10 leti. Društvo lesarjev Slovenije je podelilo priznanja prof. dr. Katarini Čufar, Tomažu Vilarju, univ. dipl. inž. les. in športnemu društvu »Buldožerji« Rudno.



Alenka, Matjaž, Silvana in Franc Šivic iz družinskega podjetja SILVAAPIS d.o.o., ki je bilo letošnji sponzor srečanja, so vsi člani ALUMNI kluba Oddelka za lesarstvo. Matjaž Šivic je predstavil svojo novo knjigo *The Golden Tree* (zgoraj). Udeleženci so z veseljem prisluhnili predstavitvam tistih, ki so diplomirali pred 40 leti (spodaj levo). Generacija 1982-87 je bila najbolje zastopana in nas je z obujanjem študentskih dogodivščin popeljala v čas pred 30 leti (spodaj desno) (foto: Primož Habjan).

Tomaž Vilar je udeležence povabil na 7. veleslalom lesarjev, Borut Kričej pa je predstavil Društvo za zaščito lesa.

Uradnemu delu je sledilo druženje ob pogostitvi. Tu so se našli stari prijatelji, sklepala so se nova poznanstva in posli, vse pa je potekalo v prijateljskem vzdušju, ki je zaščitni znak tovrstnih srečanj.

Na različnih programih in stopnjah je študij došlejši zaključilo 2057 diplomantov. Vsi so neformalno člani ALUMNI kluba in so dobrodošli na vseh aktiv-

nostih. Vse, ki tega še niste storili, vabimo, da h klubu formalno pristopite in se včlanite v Društvo lesarjev Slovenije. ALUMNI klub namreč deluje kot sekcija Društva lesarjev Slovenije. Pristopnico najdete na spletni strani www.ditles.si.

Srečanje je organizirala velika ekipa zaposlenih na Oddelku za lesarstvo. Veseli smo bili pohval in zadovoljstva udeležencev. Priprave na 11. srečanje, ki bo predvidoma v novembru 2018, so se že začele. Vabljeni že sedaj. ●

Društvo inženirjev in tehnikov lesarstva Ljubljana se je preimenovalo v Društvo lesarjev Slovenije (DLS)

Na Zboru članov 2016 Društva inženirjev in tehnikov lesarstva Ljubljana so člani prepoznali potrebo po posodobitvi imena in logotipa društva. Za spremembo imena Društva inženirjev in tehnikov lesarstva Ljubljana smo se odločili, ker je bilo staro ime omejujoče z vidika izobrazbe in geografsko. Pri spremembi imena nas je vodila ideja, da bi se lahko vsakdo, ki se ukvarja z lesom oziroma deluje v lesarstvu, videl tudi kot član na-

šega društva. Naše društvo je najbolj aktivno lesarsko društvo v Sloveniji. Člani in podporniki društva prihajajo iz vseh koncev Slovenije in ne zgolj iz osrednje Slovenije. Ime društva so izbirali člani v dveh krogih spletnega glasovanja in izbrali **Društvo lesarjev Slovenije**. Vsi, ki se na kakršenkoli način ukvarjate z lesom, vabljeni, da se včlanite. Vse informacije najdete na spletni strani www.ditles.si. ●

Recenzenti člankov/prispevkov revije Les/Wood v letu 2017

V letu 2017 so pri recenzijah člankov za objavo v reviji Les/Wood (letnik 66, številki 1 in 2) sodelovali številni recenzenti.

Vsem se iskreno zahvaljujemo za hiter odziv ter poglobljene in kakovostne recenzije, ki so bile v veliko pomoč tako uredništvu kot avtorjem člankov. Želimo si, da bi se to sodelovanje nadaljevalo tudi v prihodnje.

Željko Gorišek ●	● Marko Petrič
Petra Grošelj ●	● Denis Plavčak
Primož Habjan ●	● Ida Poljanšek
Matej Jošt ●	● Igor Potočnik
Mirko Kariž ●	● Bogdan Šega
Manja Kitek Kuzman ●	● Nejc Thaler
Boštjan Lesar ●	● Jelena Trajković
Miran Merhar ●	● Janja Zule
Leon Oblak ●	●

