



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

Izveček: 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 lepljenca.

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 pohištvo. 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 deforma-

cije (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/poravnostjo. 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 luščenelega 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 nenasilni 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).

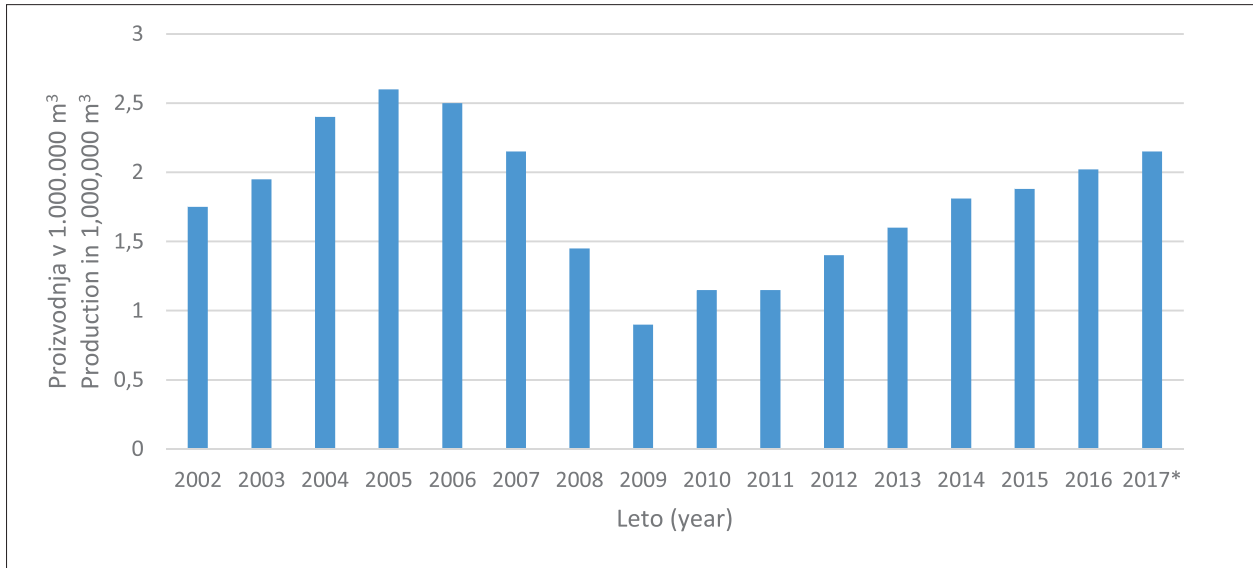
Prednosti LVL pred masivnim lesom in ostalimi lesnimi konstrukcijskimi proizvodi so številne. LVL tehnologija izrablja tudi furnir, ki je bil pridobljen iz hlodovine manjših premerov, ki ni primerna za žagan les. Ker so iz furnirjev izločene vse bistvene napake, ostale pa so naključno porazdeljene v 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 Rbirsch 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 dotodanjih 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 pritisnega 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):

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

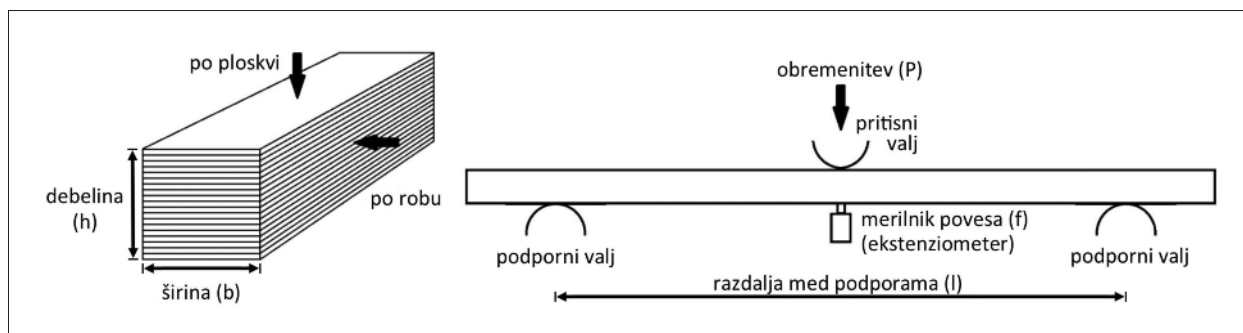
- P_{40} ali P_{10} 40 % ali 10 % maksimalne sile (N)
- f_{40} ali f_{10} povese pri 40 % ali 10 % maksimalne sile (mm)

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

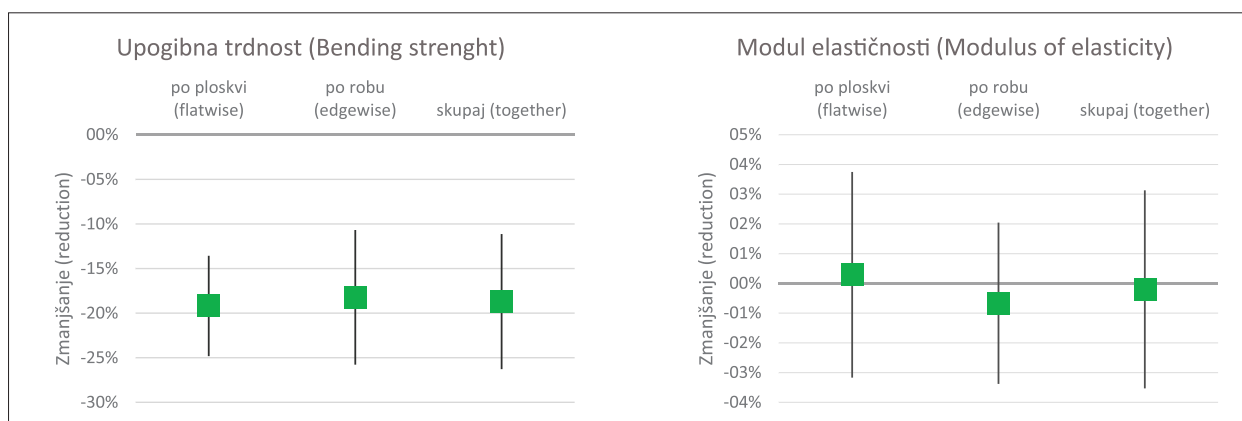
3 RESULTS AND DISCUSSION

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 prinaša 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 %

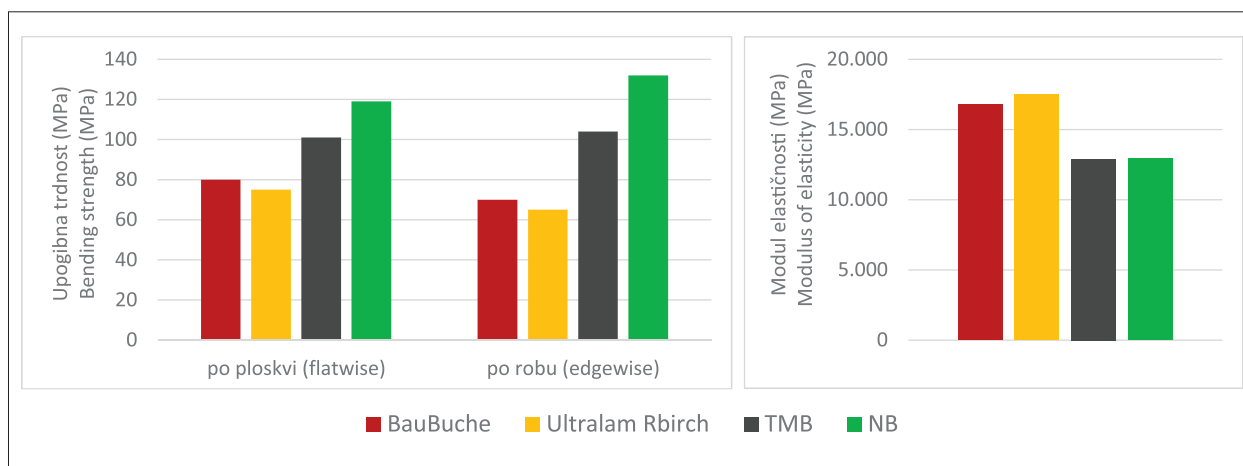
višjo upogibno trdnost (P-vrednost = 0,25) kot pri obremenitvah po ploskvi.

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 Rbirch).

*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 Rbirch.

*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 bukovega 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 Rbirsch. 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 Rbirsch, 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 edgewise 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 Silvaprodukt 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.