

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Boštjan Čamernik

AKUSTIČNE LASTNOSTI LEPLJENEGA LESA

DIPLOMSKO DELO
Visokošolski strokovni študij

ACOUSTICAL PROPERTIES OF GLUED LAMINATED WOOD

GRADUATION THESIS
Higher professional studies

Ljubljana, 2016

Diplomsko delo je zaključek visokošolskega strokovnega študija lesarstva na Biotehniški fakulteti v Ljubljani. Opravljeno je bilo na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval doc. dr. Aleša Stražeta in za recenzenta prof. dr. Milana Šerneka.

Mentor: doc. dr. Aleš Straže

Recenzent: prof. dr. Milan Šernek

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Diplomsko delo je rezultat lastnega raziskovalnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svoje naloge v polnem tekstu na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je naloga, ki sem jo oddal v elektronski obliki, identična tiskani verziji.

Boštjan Čamernik

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Vs
DK	UDK 630*812.12
KG	les/slojnat furnirni les/lepila/akustične lastnosti
AV	ČAMERNIK, Boštjan
SA	STRAŽE, Aleš (mentor)/ŠERNEK, Milan (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2016
IN	AKUSTIČNE LASTNOSTI LEPLJENEGA LESA
TD	Diplomsko delo (Visokošolski strokovni študij)
OP	27 str., 4 pregl., 11 sl., 26 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Raziskali smo vpliv lepljenja lesa na njegove akustične lastnosti. Izbrali smo masivni smrekov les (<i>Picea abies</i>) in smrekov slojnat furnirni les (LVL) z debelino furnirja 0,8, 1,4 in 2,5 mm. LVL smo lepili s polivinilacetatnim (PVAc) in urea-formaldehidnim (UF) lepilom v preizkušance dimenzij $400 \times 40 \times 20$ mm. Pri vzdolžnem in prečnem mehanskem vzbujanju smo izmerili frekvenčni odziv in dušenje zvoka ter določili togost ter kazalnike akustične kakovosti. Pri LVL sta število lepilnih slojev in vrsta lepila pozitivno vplivala na gostoto in togost materiala. Višjo togost smo dosegli pri LVL preizkušancih lepljenih s PVAc lepilom. Lepljenje pa je negativno vplivalo na hitrost zvoka v vzdolžni smeri preizkušancev in tudi na dušenje zvoka. Razlike med proučevanimi lepili v tem primeru nismo potrdili. Akustični koeficient K , učinkovitost akustične pretvorbe ACE in relativna učinkovitost akustične pretvorbe $RACE$ je bila pri LVL bistveno nižja kot pri masivnem lesu. Ti parametri se niso značilno razlikovali glede na uporabljeno lepilo ali debelino furnirja.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND	Dvl
DC	UDC 630*812.12
CX	wood/laminated veneer lumber/glues/acoustical properties
AU	ČAMERNIK, Boštjan
AA	STRAŽE, Aleš (supervisor)/ŠERNEK, Milan (reviewer)
PP	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c VIII/34
PB	University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY	2016
TY	ACOUSTICAL PROPERTIES OF GLUED LAMINATED WOOD
DT	Graduation Thesis (Higher professional studies)
NO	27 p., 4 tab., 11 fig., 26 ref.
LA	Sl
AL	sl/en
AB	We investigated the effect of gluing of wood to its acoustic properties. We chose solid spruce wood (<i>Picea abies</i>) and spruce laminated veneer lumber (LVL) with thickness of veneer 0.8, 1.4 and 2.5 mm. LVL was glued with polyvinyl acetate (PVAc) and urea-formaldehyde (UF) adhesives in the test specimens of $400 \times 40 \times 20$ mm. Longitudinal and transverse mechanical excitation of specimens was used, where the frequency response, sound damping, mechanical stiffness and acoustic quality indicators were determined. The number of veneer layers of LVL had a positive impact on the density and stiffness of the material. Higher stiffness was achieved in LVL specimens glued with PVAc adhesive. Bonding adversely affected the speed- and damping of sound in the longitudinal direction of the specimens. Differences between the studied adhesives in this case were not confirmed. Acoustic coefficient K, the acoustic conversion efficiency ACE and the relative acoustic conversion efficiency $RACE$ were significantly lower at the LVL than that of solid wood. These parameters were not significantly different depending on the thickness of the used veneer.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	III
KEY WORDS DOCUMENTATION.....	IV
KAZALO VSEBINE.....	V
KAZALO PREGLEDNIC.....	VI
KAZALO SLIK.....	VII
1 UVOD.....	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA:.....	1
1.2 CILJI NALOGE.....	1
1.3 DELOVNE HIPOTEZE:.....	1
2 PREGLED LITERATURE.....	2
2.1 FIZIKALNE IN MEHANSKE LASTNOSTI SLOJNATEGA FURNIRNEGA LESA.....	2
2.2 LEPILA ZA LEPLJENJE LESA.....	5
2.2.1 Lepilni spoj.....	6
2.2.2 Polikondenzacijska urea-formaldehidna (UF) lepila.....	6
2.2.3 Polimerizacijska PVAc lepila.....	7
2.3 AKUSTIČNE LASTNOSTI LEPLJENEGA LESA.....	8
2.3.1 Uporaba slojnatega furnirnega lesa v glasbenih inštrumentih.....	8
2.3.2 Lepljen les v arhitekturni akustiki.....	9
3 MATERIALI IN METODE.....	12
3.1 IZBIRA LESA.....	12
3.2 IZBIRA LEPIL.....	12
3.3 IZDELAVA PREIZKUŠANCEV.....	12
3.3.1 Opis preizkušancev.....	12
3.3.2 Stroji, naprave, postopek in fizikalni pogoji pri izdelavi preizkušancev:.....	13
3.4 DOLOČANJE DINAMIČNIH MEHANSKIH IN AKUSTIČNIH LASTNOSTI PREIZKUŠANCEV.....	16
3.4.1 Eksperimentalna veriga.....	16
3.4.2 Izračun fizikalnih, mehanskih in akustičnih parametrov.....	16
4 REZULTATI IN RAZPRAVA.....	19
4.1 FIZIKALNE IN DINAMIČNE MEHANSKE LASTNOSTI SLOJNATEGA FURNIRNEGA LESA.....	19
4.2 AKUSTIČNE LASTNOSTI SLOJNATEGA FURNIRNEGA LESA PRI PREČNEM MEHANSKEM NIHANJU.....	21
4.2.1 Vpliv lepljenja lesa na dušenje zvoka.....	21
4.2.2 Vpliv lepljenja lesa na učinkovitost akustične pretvorbe.....	23
5 SKLEPI.....	25
6 VIRI.....	26

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1	Primerjava gostote masivnega lesa in LVL pri vročem in hladnem lepljenju (v oklepaju koeficient variacije v %) (prirejeno po Ščernjavič, 2008)	4
Preglednica 2	Koeficient absorpcije zvoka različnih lesnih materialov v odvisnosti od frekvenčnega območja (Xu in sod., 2004)	11
Preglednica 3	Povprečne vrednosti (Povp.) gostote, hitrosti zvoka ter modula elastičnosti za masivni les in slojnat furnirni smrekov les (KV% - koeficient variacije v %)	19
Preglednica 4	Povprečne vrednosti (Povp.) specifičnega modula elastičnosti, dušenja zvoka, akustičnega koeficienta, akustične učinkovitosti in relativne akustične učinkovitosti za masivni les in slojnat furnirni smrekov les (KV% - koeficient variacije v %)	22

KAZALO SLIK

Slika 1	Porazdelitev in variabilnost lastnosti različnih konstrukcijskih proizvodov iz lesa (Šernek in Jošt, 2004).....	2
Slika 2	Primerjava mehanskih lastnosti žaganega lesa (C24), lameliranih lepljenih nosilcev (GL32) in LVL (Ranta-Maunus 1995).....	3
Slika 3	Zveza med gostoto in upogibno togostjo masivnega lesa in LVL (prirejeno po Ščernjavič, 2008).....	4
Slika 4	Zveza med gostoto in upogibno trdnostjo masivnega lesa in LVL (prirejeno po Ščernjavič, 2008).....	5
Slika 5	Konstrukcijska izvedba prostorsko oblikovane električne kitare s trupom iz slojnatega furnirnega lesa (Parker in Fishman, 2008).....	9
Slika 6	Preizkušanci iz slojnatega furnirnega lesa pred formatiranjem na končne dimenzije.....	15
Slika 7	Eksperimentalna postavitev določanje akustičnih lastnosti LVL pri prostem prečnem- in vzdolžnem mehanskem nihanju.....	16
Slika 8	Primer posnetega časovnega signala (levo) in določitev točk posamičnih amplitud signala za prilagoditev eksponentnemu modelu (desno).....	18
Slika 9	Povezanost togosti preizkušancev (E_B) z njihovo gostoto (ρ).	20
Slika 10	Primerjava togosti preizkušancev, določena z vzdolžnim vzbujanjem (E_L) in prečnim upogibnim vzbujanjem (E_B).....	21
Slika 11	Kompresijske porušitve LVL iz topolovine na lokaciji lepilnih spojev (levo 10-slojni LVL, desno 11-slojni LVL) (Xue in Hue 2013).....	22

1. UVOD

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Lepljen les ima v splošnem zaradi svoje nehomogene strukture in prekinjene povezave med vlakni slabše akustične in resonančne lastnosti, kot naraven masivni les. Prekinjenost vlaknaste strukture in lepilni spoji skupaj s plastičnimi deformacijami strukture v neposredni bližini le teh pogosto povzročajo večje dušenje mehanskih nihanj. To ima lahko za posledico krajšanje krivulje nihanja lepljenega kompozita ter nižje amplitude nihanja od masivnega lesa. Navkljub vsemu pa lepljen les omogoča večjo pestrost oblik pri gradnji lesenih glasbenih instrumentov. Slednje je še posebej odlika slojnatega furnirnega lesa kot tudi širše vezanega lesa, kar je lahko konkurenčna prednost teh materialov pri rabi v akustične namene.

1.2 CILJI NALOGE

Izdelali bomo lepljene furnirne kompozite oz. slojnat furnirni les iz furnirjev nekaterih domačih lesnih vrst, pri čemer bomo variirali debeline posameznih slojev ter njihovo število in debelino. V eksperiment bomo vključili nekaj tipičnih lepil in izvedli standardne postopke lepljenja. Preizkušance za testiranje akustičnih lastnosti bomo proučevali v geometrijsko primerljivih razmerjih. Proučili bomo njihov odziv na zunanjo mehansko vzbujanje in dušenje nihanja.

1.3 DELOVNE HIPOTEZE:

- Pri lepljenem lesu se bo izboljšala akustična anizotropija v primerjavi z masivnim lesom.
- Število slojev furnirjev bo negativno vplivalo na dušenje nihanja, obratno zvezo pa je pričakovati z večanjem debeline slojev furnirja.
- Višanje temperature in tlaka stiskanja in izbira hidrofobnih lepil bo omogočilo zmanjšanje dušilnih lastnosti lesnega kompozita ter s tem izboljšanje njegovih resonančnih lastnosti.

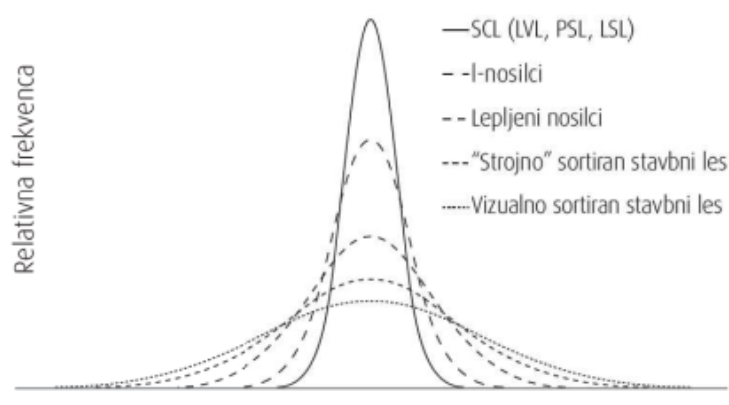
2. PREGLED LITERATURE

Pojav lesnih slojnatih kompozitov zasledimo že med prvo in drugo svetovno vojno ob razvoju sintetičnih lepil. V začetku je med najbolj znanimi bila avionska furnirna plošča, po drugi svetovni vojni pa je šel razvoj še v številne druge tipe ploščnih kompozitov. V gradbeništvu se je nadaljnji razvoj kompozitov na osnovi lepljenega lesa razmahnil še posebej v 70-ih letih prejšnjega stoletja, in sicer z razvojem lepljenega konstrukcijskega lesa (Ireneusz, 2011).

2.1 FIZIKALNE IN MEHANSKE LASTNOSTI SLOJNATEGA FURNIRNEGA LESA

Vežan les in slojnat furnirni les (LVL) sta narejena iz lihega števila slojev luščenega furnirja različnih debelin (od 2,6 mm do 3,3 mm). Pri vežanem lesu pogosteje uporabljamo furnir listavcev (topol, breza, bukev), pri slojnatem furnirnem lesu pa prevladujejo iglavci (duglazija, smreka, bor, jelka) (Resnik, 1987).

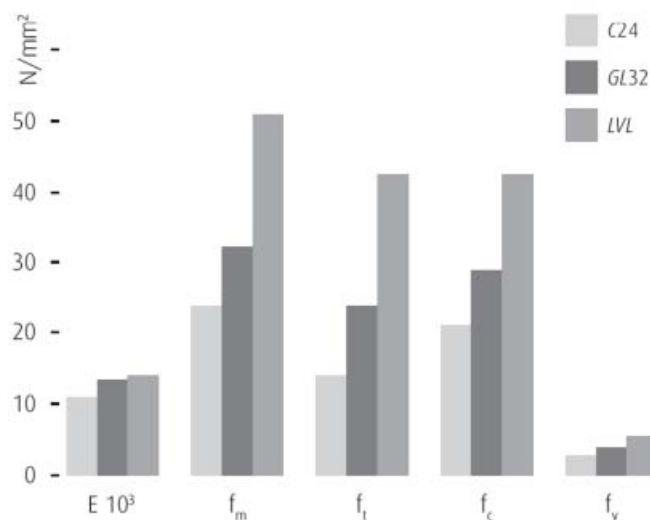
Slojnat furnirni les se uporablja v pohištveni industriji, za mizne plošče, za notranje dele predalov in za razne ploskovne elemente. Pogosta raba tega materiala pa je tudi v gradbeništvu, za samostojne nosilce, kot element paličij ali v I-profilih. Slojnat furnirni les ima v primerjavi z masivnim lesom v vzdolžni smeri običajno večjo upogibno trdnost, višji modul elastičnosti in boljšo strižno trdnost. Osnovni razlogi so v zmanjšani razpršenosti naravnih napak lesa oz. njihova izločitev (Resnik, 1990, Šernek in Jošt, 2004).



Slika 1 Porazdelitev in variabilnost lastnosti različnih konstrukcijskih proizvodov iz lesa (Šernek in Jošt, 2004)

Stopnja dezintegracije se z vidika mehanskih lastnosti, ko slojnat furnirni les primerjamo z lepljenim lesom in masivnim lesom, izkaže kot ugodna. V tej primerjavi potrjujejo primat

slojnatega furnirnega lesa pri natezni trdnosti (f_t), tlačni trdnosti (f_c), strižni trdnosti (f_v) in pri modulu elastičnosti (E) (Slika 2, Ranta-Maunus, 1995).



Slika 2 Primerjava mehanskih lastnosti žaganega lesa (C24), lameliranih lepljenih nosilcev (GL32) in LVL (Ranta-Maunus, 1995)

Slojnat furnirni les je večinoma lepljen z lepili za konstrukcijsko uporabo, ki imajo visoko trdnost in trajnost, so odporna proti vodi, povišani vlažnosti in temperaturi ter biološkim dejavnikom. V splošnih in konstrukcijskih namenih je pomembno tudi vzdolžno spajanje furnirja. Spoji so običajno med seboj zamaknjeni za 100 do 120 mm, s čelno sestavo, s prekrivanjem, s poševnim spojem ali s čelno sestavo z ojačitvijo. Najpogosteje se uporablja poševna sestava LVL, kjer se dosežejo najboljše trdnostne lastnosti, vendar je tehnološko zahtevna.

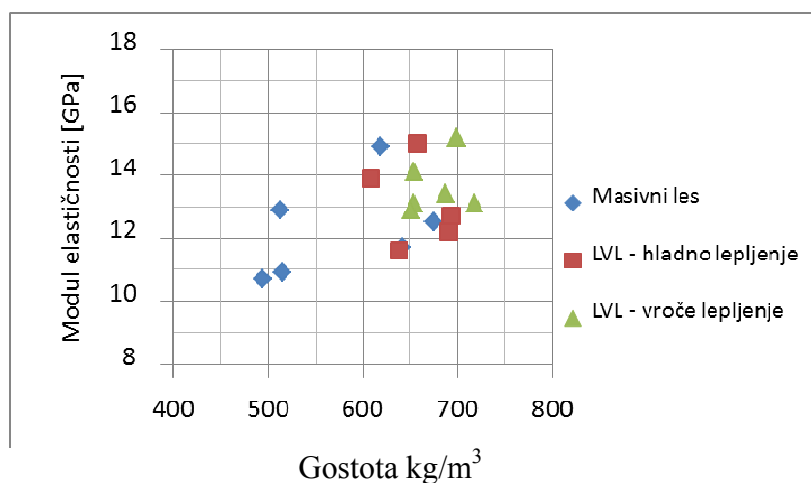
Prvi razlog za spremenjene mehanske lastnosti slojnatega furnirnega lesa v primerjavi s masivnim lesom je razlika v gostoti, ki je večinoma posledica vnosa lepila, v manjši meri pa na njo lahko vpliva tudi morebitna zgostitev lesa ob stiskanju. Ščernjavič (2008) pa potrjuje tudi razlike v gostoti LVL, ki so nastale pri hladnem in vročem lepljenju (Preglednica 1). Pri vročem stiskanju je raziskava potrdila višjo gostoto LVL pri vseh uporabljenih lesnih vrstah, avtor pa jo pripisuje boljšemu prodiranju in sidranju lepila v strukturo lesa. V raziskavi so za vroče lepljenje uporabili fenol-formaldehidno lepilo (delež suhe snovi 46%, pretočni čas (20 °C) 90 do 110 s) za hladno lepljenje pa PVAc lepilo (pretočni čas (20 °C) 140 s).

Preglednica 1 Primerjava gostote masivnega lesa in LVL pri vročem in hladnem lepljenju (v oklepaju koeficient variacije v %) (prirejeno po Ščernjavič, 2008)

Lesna vrsta	Povprečna gostota [kg/m^3]		
	Masivni les	LVL	
		Vroče lepljenje	Hladno lepljenje
Breza	619 (8,5 %)	698 (1,7 %)	657 (1,3 %)
Bukev	642 (2,2 %)	718 (0,7 %)	691 (2,7 %)
Jelša	494 (2,3 %)	654 (0,4 %)	638 (3,0 %)
Lipa	515 (8,3 %)	651 (2,2 %)	622 (2,2 %)
Macesen	675 (4,7 %)	687 (0,2 %)	693 (1,9 %)
Smreka	512 (2,5 %)	654 (3,1 %)	608 (1,9 %)

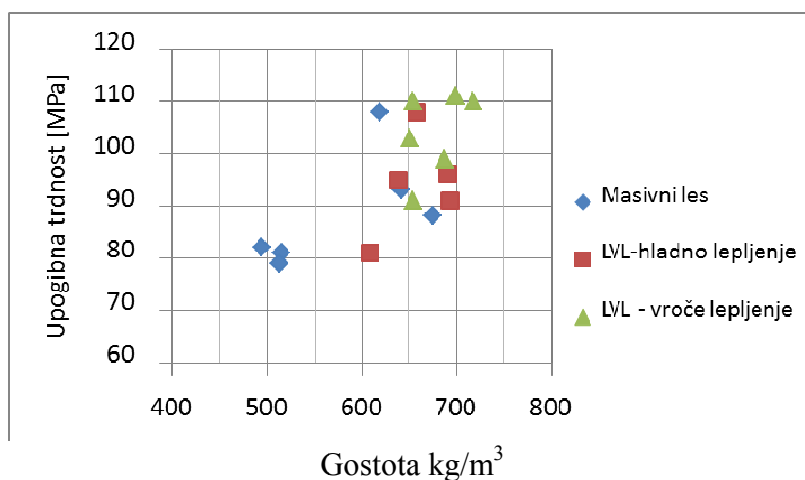
Enako zakonitost je omenjena raziskava (Ščernjavič, 2008) potrdila tudi pri togosti in trdnosti slojnatega furnirnega lesa, če ga primerjamo po postopkih lepljenja ter glede na kontrolne preizkušance iz masivnega lesa. Tudi v tem primeru je študija potrdila najnižje vrednosti pri masivnem lesu, višje vrednosti pri LVL, ki je bil hladno lepljen, najvišje pa pri vroče lepljenem LVL.

Togost materialov raziskave pogosto povezujejo z njihovo gostoto ter z drugimi strukturnimi karakteristikami. Raziskava LVL različnih lesnih vrst (Ščernjavič, 2008) pri tem ne potrjuje spremenjene zveze med tema dvema veličinama, ko primerjamo LVL, lepljen po obeh postopkih ter masivni les (Slika 3). Zaključimo lahko, da se togost povečuje linearno z gostoto in to podobno pri LVL in masivnem lesu.



Slika 3 Zveza med gostoto in upogibno togostjo masivnega lesa in LVL (prirejeno po Ščernjavič, 2008)

Tudi zveza upogibne trdnosti in gostote lesa se pri proučevanju slojnatemu furnirnemu lesu ni razlikovala med postopoma lepljenja ter glede na masivni les. V tem primeru povečanje upogibne trdnosti LVL prav tako pripišemo povečanju gostote materiala (LVL) ne pa tudi morebitni spremembi njegove strukture (Slika 4).



Slika 4 Zveza med gostoto in upogibno trdnostjo masivnega lesa in LVL (prirejeno po Ščernjavič, 2008)

V grobi razdelitvi lepil poznamo lepila naravnega izvora in lepila sintetičnega izvora. Po izvoru so starejša lepila naravnega izvora vendar zaradi slabših mehanskih lastnosti v razmerju s sintetičnimi lepili izgubljajo na uporabnosti. Danes nam razvoj tehnologije in materialov omogoča izdelavo namenskih lepil. Taka lepila so namenjena ozkemu področju uporabe. Ali je lepilo ustrezno ali ne je odvisno od področja uporabe in vrste izdelka. V splošnem pa velja nekaj osnovnih zakonitosti, ki definirajo kvalitetno in uporabno lepilo (Resnik, 1989):

- ne obrablja orodja,
- imajo čim daljši čas pripravljenosti mešanice (angl. »pot life«),
- so kemijsko nevtralna, da ni poškodb na lesu,
- so primerna elastičnost oziroma togost lepilnega spoja ter
- imajo primerno viskoznost.

V skupino sintetičnih lepil uvrščamo polimerizacijska, polikondenzacijska in poliadiacijska lepila. Zaradi svoje praktičnosti in ostalih mehanskih lastnosti so najbolj v uporabi polimerizacijska in polikondenzacijska lepila. Med polimerizacijska lepila uvrščamo polivinilacetatna lepila (PVAc), polivinilalkoholna, polivinilkloridna in poliakrilatna lepila. Med polikondenzacijska lepila pa uvrščamo urea-formaldehidno lepilo, fenol-formaldehidno, melamin-formaldehidno, poliamidna, poliesterska in silikonska lepila (Resnik, 1989).

2.2.1 Lepilni spoj

Osnovno zgradbo lepilnega spoja lahko prikažemo shematsko z verigo, ki je sestavljena iz devetih členov, kjer je trdnost lepilnega spoja enaka trdnosti najšibkejšega člena.

Členi:

- 1. člen, predstavlja osnovne lastnosti lepila
- 2. in 3. člen, predstavljata mejni sloj lepilnega filma
- 4. in 5. člen, predstavljata osnovno privlačnost med različnimi molekulami. Adhezijska privlačnost se vzpostavi med molekulami lesa in lepila. Temelji lahko na mehanski povezavi, kemijski ni fizikalni vezi.
- 6. in 7. člen je sloj tik ob površini lepljenca, skozi ta del penetrira lepilo in ga učvrsti
- 8. in 9. člena, sta skrajna člena, ki se v procesu povežeta. Predstavljata osnovne lastnosti lepilnega spoja (gostota, poroznost, permeabilnost in vlažnost lesa (Marra, 1992).

Kvaliteta lepilnega spoja je dosežena, če zagotovimo ustrezen proces pri oblikovanju oziroma utrjevanju lepilnega spoja, na katerega predvsem vplivajo debelina nanosa lepila, zadostna omočitev in optimalna penetracija lepila v pore lesa ter prenos na obe površini lepljenca. Potrebni so tudi drugi optimalni pogoji lepljenja, kot so vlažnost lesa, tlak pri stiskanju, čas stiskanja in vmesni čas (Seljak in Šernek, 2005).

Vlažnost lesa med lepljenjem igra pomembno vlogo pri strižnih trdnostih lepilnega spoja. Večja, kot je vlažnost lesa oz. lepljenca nižja je strižna trdnost lepilnega spoja. Pri vlažnosti furnirja med 11 in 13,1 % se je denimo strižna trdnost zmanjšala za eno petino. Proces vročega stiskanja je pri tem pokazal identične rezultate s procesom visokofrekvenčnega stiskanja (Šernek, 1999).

2.2.2 Polikondenzacijska urea-formaldehidna (UF) lepila

Način utrjevanja teh lepil je kemijski in sicer poteče kemijski proces polikondenzacije. V temu procesu je pomemben nadzor nad temperaturo.

Proces se deli v tri faze:

- Faza A – rezol stanje, v tej fazi lepilo nabrekne in je topno ter termoplastno
- Faza B – rezitol stanje, lepilo nabreka, ni več topno in je termoplastno
- Faza C – rezit stanje, lepilo ne nabreka več, se ne topi in je duroplastno (Resnik, 1989).

UF lepila spadajo v skupino polikondenzacijskih lepil in utrjujejo kemično. Prednosti UF lepil so predvsem (Šernek, 2005):

- enostavna uporaba,
- trdni lepilni spoji,
- brezbarvnost lepilnega spoja,

- cenenost in možnost modificiranja z drugimi lepili.

Slabosti UF lepil:

- slaba odpornost proti vlagi,
- hidroliza lepilnega spoja,
- obraba rezil zaradi trdote,
- padanje trdnosti z debelino lepilnega spoja,
- sproščanje formaldehida.

Sestava UF lepila:

- urea,
- formaldehid.

Komponenta urea ali sečnina (oz. karbamid) je prah bele barve s higroskopskimi lastnostmi, je brez vonja in je topen v vodi. Pridobivanje uree poteka na dva načina in sicer iz ogljikovega dioksida in amoniaka v avtoklavih in z delno hidrolizo cianamida. Formaldehid je plin ostrega vonja in brez barve. Z vodo ga lahko mešamo v vseh razmerjih. Vodna raztopina se imenuje formalin in ima kislo pH vrednost. Pridobivanje formaldehida poteka s procesom oksidacije metanola ob prisotnosti katalizatorja (Šernek, 2005).

Pomemben dejavnik, ki vpliva na kvaliteto lepilnega spoja je viskoznost lepilne mešanice, kot tudi viskoznost lepila skozi utrjevanje. Višja, kot je viskoznost lepilne mešanice tanjši je lahko nanos lepila na les, kar dobro vpliva na kvaliteto lepilnega spoja. V primeru prenizke viskoznosti lepilo izgubi lepilno sposobnost. Viskoznost UF lepilne mešanice nadzorujemo predvsem z dodajanjem vode ter z rotacijskim orodjem, ki vrtil mešalno lopatico. Z dodajanjem vode se viskoznost lepila znižuje, medtem ko vrtenje mešalne lopatice pripomore k homogeni strukturi lepilne mešanice. Viskoznost se s časom vrtenja lopatice znižuje.

Pri procesu utrjevanja lepilo preide iz tekočega v trdno agregatno stanje, ker se ustvarijo kohezijske vezi v lepilu in adhezijske vezi med lepilom in lepljencem. Med utrjevanjem lepila se viskoznost povečuje (Jošt in Šernek, 2009).

2.2.3 Polimerizacijska PVAc lepila

Uporaba PVAc lepil v konstrukcijske namene ni priporočljiva zaradi njegove plastomernosti oziroma lezenja, poleg tega je slabo odporen na vlago in povišano temperaturo. Ta lepila se uporabljajo predvsem v proizvodnji pohištva. Sodobna PVAc lepila imajo povečano odpornost na vlago in temperaturo (Šernek in Kutnar, 2008). PVAc lepila so sestavljena iz polivinilacetata in dodatkov s katerimi prilagodimo lastnosti lepila ustreznemu namenu. Osnovno vezivo je vodna disperzija polivinilacetata, ki je polimer, ki

nastane pri polimerizaciji vinilacetata. Vinil acetat je brezbarvna tekočina, ki je vnetljiva, vrelišče ima pri 72,7 °C. Acetilen in očetna kislina sta v osnovi surovini za pridobivanje vinilacetata.

Poznamo več načinov polimerizacije PVAc lepil in sicer:

- polimerizacija v masi,
- polimerizacija v raztopini in
- emulzijska polimerizacija.

PVAc lepila so v večji meri proizvedena z emulzijsko polimerizacijo. Viskoznost PVAc emulzije določajo:

- vsebnost suhe snovi,
- porazdelitev velikosti delcev v emulziji in
- vrsta uporabljenega emulgatorja.

Odpornost suhega filma proti vodi je odvisna od vrste uporabljenega zaščitnega koloida. Zaščitna emulzija s koloidi na osnovi celuloze ali pa z raznimi dodatki omogoča izdelavo PVAc lepila z relativno dobro odpornostjo na vlago (Šernek in Kutnar, 2008).

2.3 AKUSTIČNE LASTNOSTI LEPLJENEGA LESA

2.3.1 Uporaba slojnatega furnirnega lesa v glasbenih inštrumentih

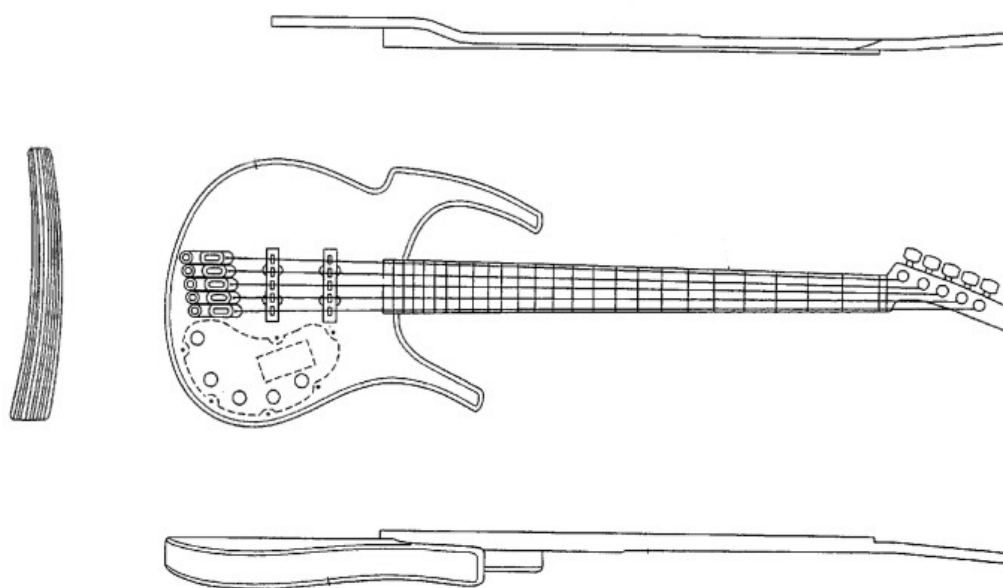
Slojnat furnirni les se pogosto, še posebej v sodobnem času, uporablja tudi pri izdelavi glasbenih inštrumentov. Prvi razlogi uporabe LVL v te namene so vsekakor povezani z omejenimi količinami resonančnega lesa in njegovo ceno. Vzporedno pa se je z moderno glasbo, predvsem v 2. polovici 20. stoletja, močna razmahnilo povpraševanje po glasbilih in posledično tudi proizvodnja glasbenih inštrumentov.

Visoka togost in trdnost slojnatega furnirnega lesa sta ena od prvi razlogov za njegovo uporabo v glasbilih. V 60-tih letih 20. stoletja so ga začeli uporabljati za proizvodnjo delov kot tudi celotnih električnih kitar. Sprva je veljal le za nadomestek masivnega resonančnega lesa listavcev, tudi tropskih. Kot med furnirskimi listi se je gibal med 0 ° in 90 °, pogosteje pa le med 5 ° in 45 ° ali med 10 ° in 15 ° (Parker in Fishman, 2008). Kot prednost pred uporabo masivnega lesa se pri tem izpostavlja tudi dimenzijska stabilnosti in s tem majhna verjetnost nastanka razpok ob nihajočih klimatskih spremembah.

Z razvojem na tem področju so se pojavile še številne druge prednosti uporabe LVL za izdelavo glasbil. Med pomembnejše spada poenostavljena izdelava inštrumentov različnih ravninskih in prostorskih oblik brez zahtevne mehanske obdelave. V te namene so pričeli uporabljati dvo-dimenzionalne in tri-dimenzionalne kalupe za stiskanje slojnatega

furnirnega lesa v stiskalnicah ob neposrednem vnašanju veziv v kalup ali pa s predhodnim nanosom lepila. Prednosti takšnega postopka izdelave so predvsem v širokem naboru možnih oblik izdelkov ob minimalni potrebni nadaljnji mehanski obdelavi le teh (Slika 6). Pojavile so se tudi monolitne izvedbe inštrumentov, ki so bili lahko izdelani zgolj v enem kosu, s čimer se še enostavneje doseže primerna togost konstrukcije.

Pri enostavnih kot tudi pri zahtevnejših prostorskih oblikah glasbenih inštrumentov se v primeru rabe masivnega lesa poslužujemo njegove mehanske obdelave. Pri klasični izdelavi se pri tem uporablja denimo dolbenje in brušenje, v strojni obdelavi pa pogosto različni načini rezkanja. Ne glede na vrsto tehnološkega postopka prihaja pri zahtevnejših prostorskih oblikah do prekinjanja lesnih vlaken in izrazitega odklanjanja od poteka osnovne oblike inštrumenta. To lahko zaradi anizotropnih mehanskih in fizikalnih lastnosti lesa povzroča slabšanje akustičnih karakteristik inštrumentov, predvsem kot posledica velikih kotov med lesnimi vlakni ter ravnino inštrumenta, kjer tudi pričakujemo največje mehanske vibracije.



Slika 5 Konstrukcijska izvedba prostorsko oblikovane električne kitare s trupom iz slojnatega furnirnega lesa (Parker in Fishman, 2008)

2.3.2 Lepljen les v arhitekturni akustiki

Akustične lastnosti lepljenega lesa so zaradi njegove široke uporabe pomembne pri različnih vrstah izdelkov. Tako se lepljen oz. vezan les uporablja za nadzor in uravnavanje

prostorske akustike, denimo v koncertnih in športnih dvoranah ter v drugih javnih objektih in prostorih, kjer so ob uporabi objektov pomembne tudi njihove akustične lastnosti (Bucur, 2006).

Pri prostorski, arhitekturni akustiki predvsem izpostavljajo dva vidika: Generiranje in širjenje zvoka v prostoru ter fiziološke dejavnike, ki definirajo »dobro ali slabo akustiko«. Prvi del je odvisen od fizikalnih fenomenov širjenja zvoka, drugi pa od subjektivne percepcije zvoka s strani poslušalcev.

Pri novogradnjah dvoran oz. objektov namenjenih za izvedbo raznih javnih dogodkov moramo preveriti in ugoditi več zahtevam (Bucur, 2006):

3. Natančna definicija namembnosti objekta (koncerti, gledališke predstave, športni dogodki,...), ki mora biti povezana z njegovimi akustičnimi lastnostmi, kot sta čas odmeva ter lokalna ali ravninska porazdelitev zvoka oz. zvočnega tlaka.
4. Arhitekturni / gradbeni načrt objekta – oblika in dimenzije dvorane, položaj zvočnih virov, oblika in dimenzije odra, razporeditev sedišč, itd. Ti elementi so pomembni za ohranjanje primerljivega frekvenčnega spektra zvoka po odboju s tistim, emitiranim spektrom zvoka pri viru.
5. Izbira konstrukcijskih materialov. Običajno se lesene plosčne konstrukcije uporabljajo blizu oz. ob stiku z zvočnim valovanjem za absorpcijo nizkih frekvenc, hkrati pa tudi kot resonatorji. Pri funkciji resoniranja, je osnovna frekvenca konstrukcije povezana z maso na površinsko enoto ter njeno togostjo. Sicer je akustična kakovost dvoran strogo vezana na čas, ki je potreben da usmerjeni reflektirani zvočni signal doseže poslušalca, in je po pričakovanjih pod 20 ms (Beranek, 1986).

Osnovni, najpogostejše proučevani parameter materialov in izdelkov, ki se uporabljajo za doseganje ustrezne arhitekturne akustike, je poleg ustrezne gostote in mehanskih lastnosti tudi absorpcija zvoka. Raziskave večinoma potrjujejo pozitivno zvezo med absorpcijo zvoka in gostoto materialov, kar velja tudi za nekatere lesne kompozite (Wassilief, 1996). Gostota materiala pa je le eden od vplivnih parametrov, saj je absorpcija zvoka odvisna tudi od frekvenčnega območja, togosti in denimo tudi od morfologije površine (Čudina, 2014). V raziskavah tako denimo najdemo večanje absorpcije zvoka z nižanjem gostote ivernih plošč, vendar le pri nižjih frekvencah (do 250 Hz), v višjem frekvenčnem območju ($f \geq 500$ Hz), pa je trend obraten (Xu in sod., 2004). Primerjava masivnega in vezanega lesa v isti študiji pa sočasno ni odkrila razlik v absorpciji zvoka v nižjem frekvenčnem območju, pri višjih frekvencah pa je bila absorpcija večja pri gostejšem materialu, t.j. pri vezanem lesu (Preglednica 2).

Preglednica 2 Koeficient absorpcije zvoka različnih lesnih materialov v odvisnosti od frekvenčnega območja (Xu in sod., 2004)

Material	Gostota (g/cm ³)	Debelina (mm)	frekvenca zvoka (Hz) / Absorpcija				
			125	250	500	1000	2000
Masivni les (bor)	0,52	19	0,09	0,1	0,12	0,08	0,08
Vezan les	0,55	12	0,25	0,14	0,07	0,04	0,1
Iverna plošča	0,65	20	0,26	0,08	0,08	0,06	0,08
Nizko gostotna iverna plošča	0,3	30	0,06	0,15	0,37	0,65	0,52
Izolacijska vlakninska plošča	0,22	12,7	0,04	0,06	0,14	0,38	0,69
Nizko gostotna vlakninska plošča	0,25	12	0,006	0,02	0,08	0,35	0,71
Vezan les	0,55	9,5	0,28	0,22	0,17	0,09	0,1

3. MATERIALI IN METODE

3.1 IZBIRA LESA

Zaradi njegovih dobrih akustičnih lastnosti smo izdelali preizkušance iz furnirja smreke. Za čim bolj jasno primerjavo akustičnih lastnosti med preizkušanci je bistveno, da so preizkušanci narejeni iz furnirja, ki je bil rezan iz istega debla. Zaželeno lastnosti listov pri izbiri furnirja:

- radialna usmerjenost vlaken,
- majhen odklon vlaken,
- majhen delež kasnega lesa,
- majhen delež grč ali drugih rastnih anomalij, ki povečujejo dušenje nihanja.

3.2 IZBIRA LEPIL

V osnovni razdelitvi lepil poznamo lepila, ki utrjujejo kemično in lepila, ki utrjujejo fizikalno, z oddajo disperzijskega sredstva, v večini vode. Za eksperiment smo izbrali oba tipa lepil in sicer polivinilacetatno lepilo - PVAc in urea-formaldehidno lepilo - UF. Ključna oziroma najbolj vplivna razlika med izbranimi lepili so njihove mehanske lastnosti in kemična struktura v utrjenem stanju.

Primerjava mehanskih lastnosti izbranih lepil in lepljencev po lepljenju z njimi:

UF lepila

- Višja togost, kot PVAc lepila,
- bolj homogena kemična struktura,
- možno uravnavanje viskoznosti.

PV lepila

- Višji modul elastičnosti E ,
- manj homogena kemična struktura,
- oteženo reguliranje viskoznosti.

3.3 IZDELAVA PREIZKUŠANCEV

3.3.1 Opis preizkušancev

Preizkušanci so razdeljeni v sedem skupin glede na debelino furnirja oziroma število zlepljenih slojev v preizkušancu in vrsto uporabljenega lepila. V prvo skupino so umeščeni kontrolni vzorci, ki so narejeni iz masivnega lesa smreke (*Picea abies* Karst.). V temu sklopu preizkušanci ne vsebujejo lepil oziroma lepilnih spojev. V ostalih šestih skupinah so umeščeni preizkušanci iz slojnatega furnirnega lesa narejeni iz med seboj zlepljenih rezanih furnirjev iz smrekovega lesa.

Imena preizkušancev so sestavljena iz vrste uporabljenega lepila (PV – polivinilacetat, UF – urea formaldehid, K - kontrola), debeline furnirja (08, 14 in 25 za debelino furnirja 0,8 mm, 1,4 mm ter 2,5 mm) in zaporedne št. v osnovni skupini. S tem smo pridobili naslednje skupine preizkušancev z oznakami:

Kontrola – masivni les: K1...K10

Slojnat furnirni les ($d = 0,8$ mm, $n_{furnir} = 23$) zlepljen s PVAc lepilom: PV08-1...PV08-10

Slojnat furnirni les ($d = 1,4$ mm, $n_{furnir} = 13$) zlepljen s PVAc lepilom: PV14-1...PV14-10

Slojnat furnirni les ($d = 2,5$ mm, $n_{furnir} = 7$) zlepljen s PVAc lepilom: PV25-1...PV25-10

Slojnat furnirni les ($d = 0,8$ mm, $n_{furnir} = 23$) zlepljen z UF lepilom: UF08-1...UF08-10

Slojnat furnirni les ($d = 1,4$ mm, $n_{furnir} = 13$) zlepljen z UF lepilom: UF14-1...UF14-10

Slojnat furnirni les ($d = 2,5$ mm, $n_{furnir} = 7$) zlepljen z UF lepilom: UF25-1...UF25-10

Pri pripravi slojnatega furnirnega lesa smo najprej dolžinsko krojili pakete rezanega furnirja na dolžino 600 mm, čemur je sledilo širinsko spajanje furnirja z nitko do enake širine ($\bar{s} = 600$ mm). Na tako izdelane formate furnirja smo valjčno nanašali lepilo in zlagali v stiskalnico. Za posamezne skupine smo zložili 7, 13 in 23 furnirskih listov.

3.3.2 Stroji, naprave, postopek in fizikalni pogoji pri izdelavi preizkušancev:

Preizkušanci so bili izdelani v štirih korakih.

1. korak: Priprava lepila

Pri pripravi lepila je ključen parameter njegova viskoznost. Najnižjo viskoznost lepila nam torej pogojuje samo kvaliteta lepilnega spoja oziroma njegove mehanske lastnosti. V primeru prenizke viskoznosti lepilo izgubi lepilno sposobnost. Nizka viskoznost nam omogoča tudi tanek nanos lepila.

Viskoznost UF lepil:

Viskoznost UF lepil nadzorujemo predvsem z dodajanjem vode ter rotacijskim orodjem, ki vrti mešalno lopatico (glej sliko...). Z dodajanjem vode se viskoznost lepila znižuje, medtem ko vrtenje mešalne lopatice pripomore k homogeni strukturi lepilne mešanice. Viskoznost se s časom vrtenja lopatice znižuje.

Viskoznost PV lepil:

Se nadzoruje na podoben način, kot pri UF lepilih. Za razliko od UF lepil PV lepila ob dodajanju vode hitreje izgubijo svoje lepilne oziroma mehanske lastnosti. Naslednji negativen dejavnik je, da se z dodajanjem vode v PV lepila povečuje možnost zgubane površine na preizkušancu. Razlog za to je, da utrjuje z oddajo disperzijskega sredstva oziroma vode. Viskoznost PV lepila se za eksperiment ni uravnavala.

Merjene količine pri pripravi PVAc lepila:

- Masa lepila = 0,93 kg
- Površina nanosa = 6,2 m²

- Nanos na kvadratni meter = 150 g/m^2
- Volumen dodane vode = 0 L
- Čas mešanja lepilne mešanice = Ni potrebno mešati
- Št. obratov vrtalnega stroja = /
- Št. obratov oz. vrtljajev mešalne lopatice = /

Merjene količine pri pripravi UF lepila:

- Masa lepila + katalizator = /
- Površina nanosa = $6,2 \text{ m}^2$
- Nanos na kvadratni meter = 150 g/m^2
- Volumen dodane vode = /
- Čas mešanja lepilne mešanice = 0,5 kg/10min
- Št. obratov vrtalnega stroja = 3.000 obratov/min.
- Št. obratov oz. vrtljajev mešalne lopatice = 3.000 obratov/min.

2. korak: Nanos lepila

Pri nanosu lepila so za nas bistveni parametri:

- Odprti čas lepilne mešanice
- Debelina nanosa lepila

Posledice v primeru prekoračitve odprtega časa lepilne mešanice.

- Slabe mehanske lastnosti lepilnega spoja,
- ne enakomerna debeline lepilnega spoja,
- stik med sloji furnirja je prekinjen s tem je prekinjen prenos nihanja iz sloja na sloj.

Debelino nanosa smo nadzorovali s pomočjo nanašalnega valja z zalogovnikom.

Merjene količine:

- Št. prehodov z nanosom lepila = 2x,
- št. prehodov brez dodatnega nanosa lepila = 10x,
- nanos na m^2 (PVAc = 150 g/m^2 , UF = 120 g/m^2).

Prehod valja z nanosom lepila pomeni, da je bil nanašalni valj v stiku z zalogovnikom, posledica je dodaten nanos lepilne mešanice na površino. Naredili smo dva taka prehoda. Prekinjen stik med zalogovnikom in nanašalnim valjem nam omogoča, povečanje št. prehodov brez dodatnega nanosa lepilne mešanice. Naredili smo deset takih prehodov.

3. Korak - stiskanje

Uporabili smo štiri valjno hidravlično stiskalnico. Dimenzije stiskalne plošče so $2,5 \text{ m} \times 1,35 \text{ m}$. Merjene količine:

- Čas stiskanja = 7 min
- Temperatura stiskanja = 70°C
- Tlak stiskanja = 100 bar
- Zapolnjenost stiskalnice = $0,3 \text{ m}^2$
- Specifični tlak stiskanja = 10 N/cm^2

Vse tri fizikalne količine so bile pri izdelavi preizkušancev konstantne. Specifični tlak smo regulirali z zapolnjenostjo stiskalnice in barometrom, ki meri hidravlični tlak v cilindrih stiskalnice.

4. korak: Brušenje in razžagovanje na končne dimenzije

Izdelane LVL plošče smo najprej pobrusili na kontaktnem brusilnem stroju, da smo egalizirali površino. Za razžagovanje preizkušancev na končne dimenzije smo nato uporabili enolistni formatni krožni žagalni stroj. Širinsko in dolžinsko razžagovanje sta bila kontrolirana z vzdolžnim in prečnim vodikom. Končna dimenzija preizkušancev je znašala:

dolžina: $L = 400 \text{ mm}$

širina: $\check{S} = 40 \text{ mm}$

debelina: $d_K = 20 \text{ mm}$

d_{PV08} in $d_{UF08} = 19,2 \text{ mm}$

d_{PV14} in $d_{UF14} = 20,2 \text{ mm}$

d_{PV25} in $d_{UF25} = 21,5 \text{ mm}$



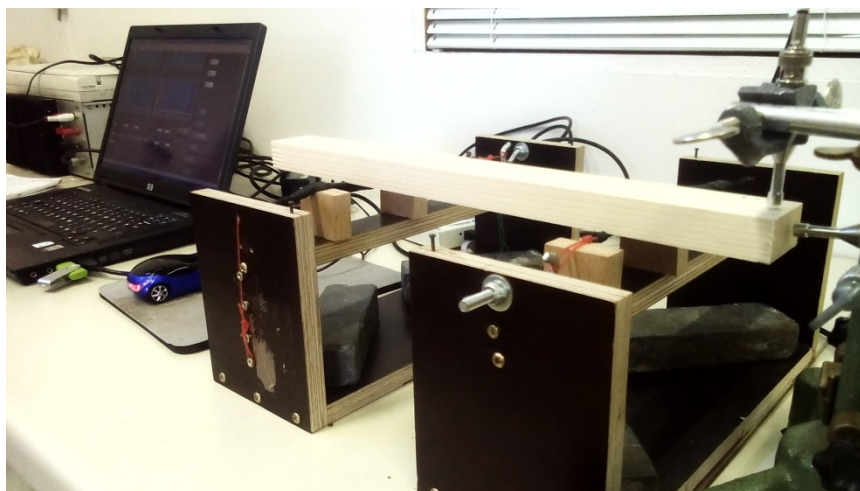
Slika 6 Preizkušanci iz slojnatega furnirnega lesa pred formatiranjem na končne dimenzije

3.4 DOLOČANJE DINAMIČNIH MEHANSKIH IN AKUSTIČNIH LASTNOSTI PREIZKUŠANCEV

3.4.1 Eksperimentalna veriga

Za meritve in snemanje zvočnega signala smo uporabili merilno verigo s kondenzatorskim mikrofonom (PCB–130D20) povezanim na osebni računalnik preko NI–9234 kartice za zajem signala proizvajalca National Instruments Ltd. Vse meritve smo zajeli v časovni zvočni signal ($t = 3$ s), v 24 bitni resoluciji z 51200 vzorci na sekundo in jih nadalje obdelovali in analizirali v programu LabVIEW 8.0 ®.

Preizkušance smo mehansko elastično vzbujali v vzdolžni in prečni smeri z impulznim udarjanjem z udarjalko s togo leseno kroglico. Mikrofon s katerim smo snemali zvočni signal smo pri tem postavljali na nasprotno stran preizkušanca, glede na mesto udarca (Slika 7). Preizkušance smo pri tem položili na dve najlonski elastični podpori, ki sta bili postavljeni na mestih vozlov v 1. prečnem nihajnem načinu ($L = 22,4$ % dolžine preizkušanca). S tem podpore minimalno vplivajo na način in dušenje nihanja preizkušanca (Bucur, 2006).



Slika 7 Eksperimentalna postavitve določanje akustičnih lastnosti LVL pri prostem prečnem- in vzdolžnem mehanskem nihanju.

3.4.2 Izračun fizikalnih, mehanskih in akustičnih parametrov

Podatki, ki smo jih direktno izmerili pri vzbujanju z elastičnim pulznim udarjanjem, so bili:

- ✓ osnovna frekvenca zvočnega signala (f_1)
- ✓ amplituda zvočnega signala (β)
- ✓ trenutno, časovno dušenje osnovne frekvence nihanja (α)

3.4.2.1 Izračun parametrov pri vzdolžnem nihanju

Hitrost zvoka je bil eden izmed kazalnikov, ki smo jih izračunali pri vzdolžnem vzbujanju preizkušancev (Bucur, 2006).

$$v = \lambda_n \times f_n = \frac{2L}{n} \times f_n \quad \dots(1)$$

Oznake:

- hitrost zvoka (v) [m/s]
- valovna dolžina nihanja (λ) v n -tem nihajnem načinu ($n = 1$) [m]
- frekvenca nihanja (f) [s^{-1}]
- dolžina preizkušanca (L) [m]

Vzdolžni dinamični modul elastičnosti (E_L), smo izračunali z enačbo, kjer smo uporabili gostoto (ρ) in hitrost zvoka (v) (Bucur, 2006):

$$E_L = \rho \times v \quad \dots(2)$$

3.4.2.2 Izračun parametrov pri prečnem nihanju

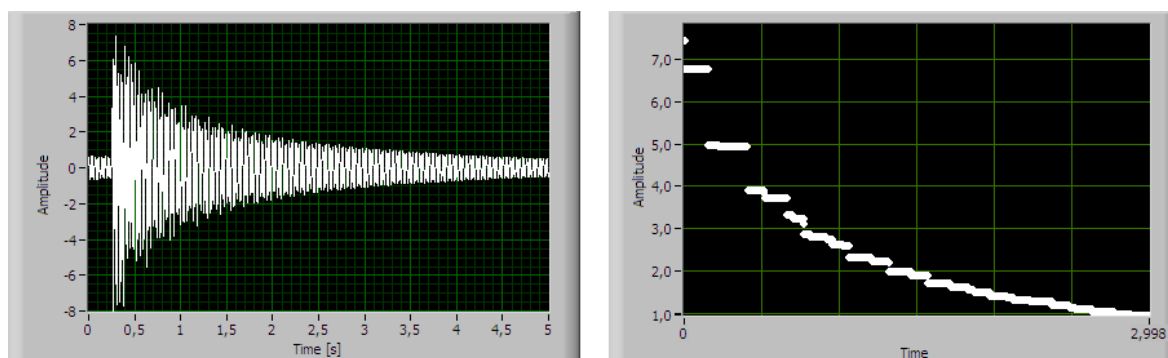
Prečni dinamični elastični modul (E_B) smo izračunali po Bernoullijevi rešitvi z enačbo 3 (Bucur, 2006).

$$E_B = \frac{4 \times \pi^2 \times L^4 \times \rho \times f_n^2 \times A}{I \times k_i^4} \quad \dots(3)$$

Oznake:

- dolžina preizkušanca (L),
- gostota (ρ),
- frekvenca (f_n), kjer n predstavlja nihajni način ($n = 1$),
- prečni prerez preizkušanca (A),
- vztrajnostni moment prereza (I), ki je za pravokotne prereze $I = bh^3/12$, kjer je b širina in h višina obdelovanca ter
- korekcijski koeficient, ki je odvisen od nihajnega načina oziroma posredno od uporabljene frekvence; za prvi nihajni način je $k_i = 4,730$

Dušenje zajetega zvočnega signala smo v programu LabVIEW 8.0 ® izračunali z diskretiziranjem signala v koordinatah zaporednih amplitud pri čemer smo z metodo najmanjših kvadratov prilagodili eksponentno pojemajoč regresijski modelu (Slika 8). Iz modela smo v programu izračunali trenutno časovno dušenje (α), z njim pa s pomočjo osnovne frekvence (f_i) še koeficient dušenja zvoka ($\tan \delta$) (En. 4).



Slika 8 Primer posnetega časovnega signala (levo) in določitev točk posamičnih amplitud signala za prilagoditev eksponentnemu modelu (desno)

- ✓ Koeficient dušenja zvoka ($\tan \delta$)

$$\tan \delta = \frac{2\alpha}{\pi f_1} \quad \dots(4)$$

Preostale akustične kazalnike smo privzeli po literaturi (Brancheriau in so. 2010, Obataya in sod. 2000, Roohnia in sod. 2011):

- ✓ Specifični elastični modul E_{sp} [GPa], kjer je ρ relativna gostota lesa (ρ_{les}/ρ_{voda})

$$E_{sp} = \frac{E_B}{\rho} \quad \dots(5)$$

- ✓ Akustični koeficient K ($m^4 s^{-1} kg^{-1}$)

$$K = \sqrt{\frac{E_B}{\rho^3}} \quad \dots(6)$$

- ✓ Učinkovitost akustične pretvorbe ACE ($m^4 s^{-1} kg^{-1}$) (angl. »Acoustical Conversion Efficiency«)

$$ACE = \frac{K}{\tan \delta} \quad \dots(7)$$

Kot dodaten kazalnik smo določili še $RACE$ (angl. »Relative Acoustical Conversion Efficiency«), ki je tako kot specifični elastični modul E_{sp} in $\tan \delta$ neodvisen od gostote lesa.

- ✓ Relativna učinkovitost akustične pretvorbe $RACE$ (km/s)

$$RACE = \frac{\sqrt{E_{sp}}}{\tan \delta} \quad \dots(8)$$

4. REZULTATI IN RAZPRAVA

4.1 FIZIKALNE IN DINAMIČNE MEHANSKE LASTNOSTI SLOJNATEGA FURNIRNEGA LESA

Preizkušanci masivnega smrekovega lesa (K), s povprečno gostoto 471 kg/m^3 so bili nekoliko nad povprečjem za to lesno vrsto (430 kg/m^3 , Gorišek 2009). Podobno, nekoliko višje vrednosti od povprečnih, ugotavljamo tudi glede hitrosti zvoka in modula elastičnosti (Preglednica 3). Modula elastičnosti, določena iz vzdolžnega in prečnega nihanja preizkušancev sta podobna, v primeru masivnega lesa pa je bil izmerjen modul pri vzdolžnem nihanju za 10 % višji. Domnevamo, da je to lahko posledica strižnih napetosti, ki vplivajo na prečno nihanje preizkušancev, ki pa jih izračun modula z Bernoullijevo enačbo ne upošteva (Bucur 2006).

Preglednica 3 Povprečne vrednosti (Povp.) gostote, hitrosti zvoka ter modula elastičnosti za masivni les in slojnat furnirni smrekov les (KV% - koeficient variacije v %)

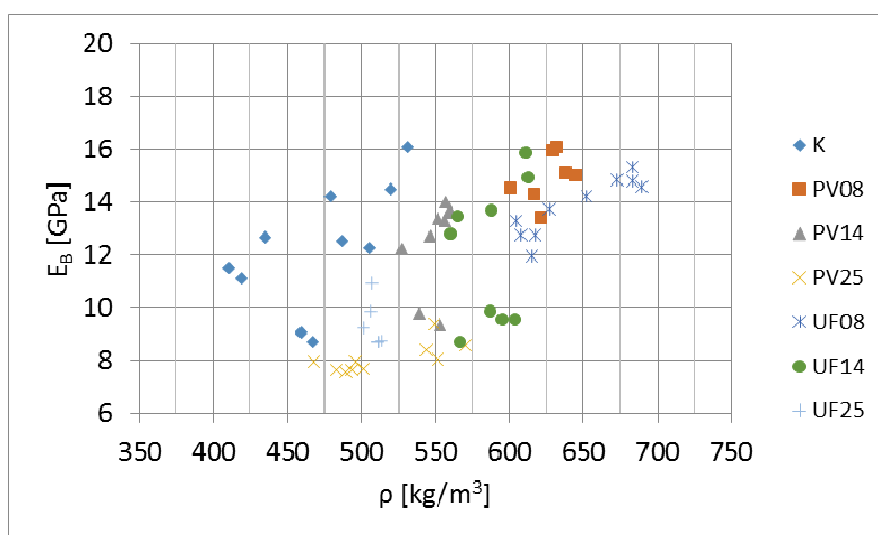
Preizkušanec	Gostota [kg/m ³]		Hitrost zvoka [m/s]		Modul elastičnosti – vzdolžno [GPa]		Modul elastičnosti – prečno [GPa]	
	Povp.	KV%	Povp.	KV%	Povp.	KV%	Povp.	KV%
K-kontrola	471	8,8	5340	9,2	13,6	20,8	12,3	18,9
PV08	624	2,4	5156	2,2	16,6	5,2	14,8	5,8
PV14	550	2,0	4987	8,0	13,8	15,6	12,4	13,9
PV25	515	6,9	4087	1,5	8,6	6,7	8,1	7,0
UF08	645	5,4	4880	0,9	15,4	5,7	13,8	8,1
UF14	588	3,4	4666	12,8	13,0	25,8	12,1	22,0
UF25	508	0,9	4591	4,8	10,7	9,5	9,4	9,6

Slojnat furnirni les je dosegal višjo gostoto, v primerjavi z masivnim lesom. Gostota slojnatega furnirnega lesa pa se je povečevala tudi s številom slojev oz. z vnosom lepila. Pri uporabi PVAc lepila je bila pri debelini furnirja 0,8 mm povprečna gostota 624 kg/m^3 , pri 1,4 mm debelem furnirju je znašala 550 kg/m^3 , pri najdebelejšem furnirju ($d = 2,5 \text{ mm}$) pa je znašala 515 kg/m^3 . Enak obraten trend naraščanja gostote s tanjšanjem debeline furnirja smo potrdili tudi pri uporabi UF lepila. Dosežene gostote LVL v tem primeru pa so v povprečju za 5 % presegle gostote LVL-preizkušancev, kjer smo uporabili PVAc lepilo.

Hitrosti zvoka v vzdolžni smeri so pri LVL preizkušancih padle v primerjavi z masivnim lesom. Sicer so bile najvišje pri 0,8 mm debelem furnirju ($v_{PV08} = 5156 \text{ m/s}$, $v_{UF08} = 4880 \text{ m/s}$), nekoliko nižje so bile pri 1,4 mm debelem furnirju ($v_{PV14} = 4987 \text{ m/s}$, $v_{UF14} = 4660 \text{ m/s}$), najnižje pa pri 2,5 mm debelem furnirju ($v_{PV25} = 4087 \text{ m/s}$, $v_{UF25} = 4591 \text{ m/s}$). Nepričakovano, obratno kot pri gostoti, so bile hitrosti zvoka nižje pri LVL-preizkušancih,

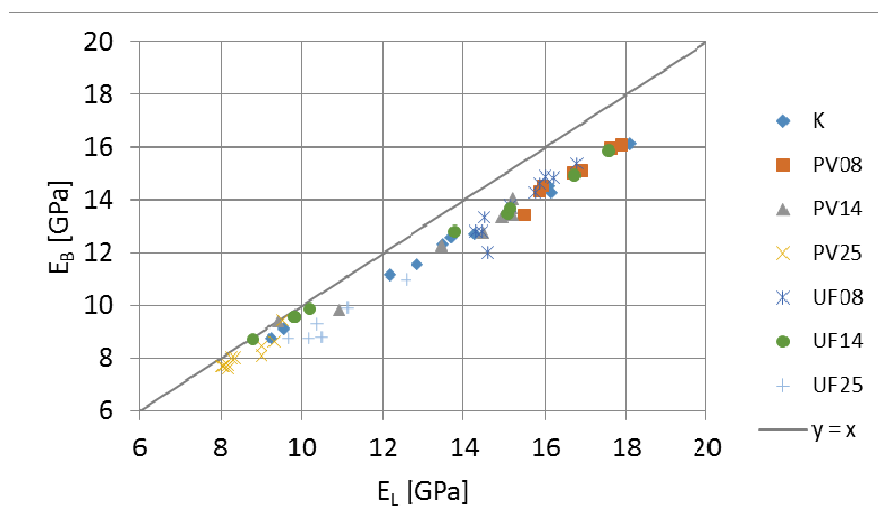
ki so bili lepljeni z UF-lepilom. Iz rezultatov domnevamo, da se pri lepljenju s PVAc in UF lepili tvorijo lepilni spoji, ki se razlikujejo v debelini in tudi mehanski togosti, kar potrjujejo predhodne raziskave (Kariž in Šernek, 2014). V tem eksperimentu smo tako potrdili večjo spremembo gostote pri uporabi PVAc lepila, hkrati pa nižjo togost, ko te LVL-preizkušance primerjamo s preizkušanci, ki so bili zlepljeni z UF-lepilom.

Raziskava je sicer tudi potrdila solidno povezanost gostote materiala, t.j. masivnega lesa in slojnatega furnirnega lesa, z njegovo togostjo (Slika 9). Glede na distribucijo vrednosti in ob relativno majhnem številu preizkušancev znotraj posamezne skupine ($n = 10$) pa lahko rečemo, da na togost vplivajo še druge fizikalne veličine. Med njimi se pogosto navaja orientacija in potek vlaken in mikrofibrilni kot (Bremaud, 2011), pri lepljenju pa vrsta lepila in lastnosti lepilnega spoja (Kariž in Šernek 2014).



Slika 9 Povezanost togosti preizkušancev (E_B) z njihovo gostoto (ρ).

Togost se tudi pri obeh skupinah LVL-preizkušancev, ne glede na debelino, razlikuje pri uporabljenih metodah, t.j. pri vzdolžnem in prečnem mehanskem nihanju. Vselej so bili moduli elastičnosti višji pri vzdolžnem nihanju (od 6 % do 14 %), ki je glede na dolžino preizkušancev ($L = 0,4$ m) potekalo tudi pri višji frekvenci zvočnega valovanja (Slika 10). Predhodne raziskave prav tako potrjujejo višje vrednosti modulov elastičnosti, ko so le ti določeni pri višji frekvenci mehanskega nihanja (Bucur, 2006). Raziskovalci vidijo razlog tudi v krajšanju karakterističnega časa v višjem frekvenčnem področju in s tem zmanjšan vpliv viskoznosti materialov (Divos, 2005).



Slika 10 Primerjava togosti preizkušancev, določena z vzdolžnim vzbujanjem (E_L) in prečnim upogibnim vzbujanjem (E_B)

4.2 AKUSTIČNE LASTNOSTI SLOJNATEGA FURNIRNEGA LESA PRI PREČNEM MEHANSKEM NIHANJU

Iz vseh rezultatov meritev pri prečnem mehanskem vzbujanju smo izračunali povprečne vrednosti posameznih akustičnih parametrov. Parametri so zbrani v preglednici 4. Z nevtralizacijo vpliva gostote na togost materiala, kar smo dosegli z izračunom specifičnega modula ugotavljamo, da se le ta izboljša pri LVL s tanjšimi furnirnimi listi. Domnevamo, da imajo lepilni spoji v tem primeru značilen vpliv, in da pozitivno prispevajo k njegovi togosti. Nižje vrednosti specifičnega modula zasledimo pri LVL s srednje-debelim furnirjem, najnižje pa pri LVL z najdebelejšim furnirjem. Ko primerjamo LVL glede uporabljenega lepila prav tako potrdimo, da je bil specifični modul elastičnosti vselej večji pri LVL, ki je bil zlepljen s PVAc lepilom.

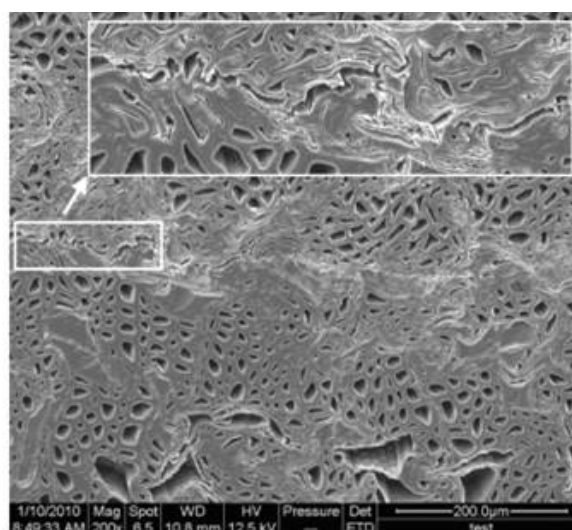
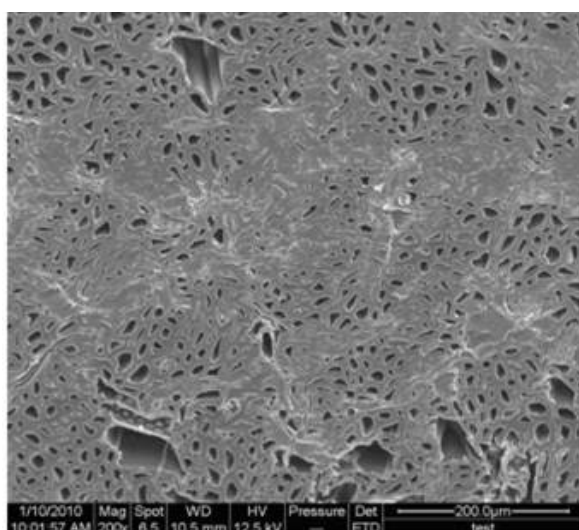
4.2.1 Vpliv lepljenja lesa na dušenje zvoka

Nasprotno, pa je število lepilnih spojev in količina vnesenega lepila negativno vplivala na dušenje zvoka ($\tan \delta$). Dušenje zvoka je bilo pri LVL bistveno večje kot pri masivnem lesu in večje pri LVL z najtanjšim furnirjem (PV08 in UF08). Prav tako pa so bile tudi razlike med uporabljenimi lepili kjer so pričakovano večje dušenje imeli preizkušanci, zlepljeni s PVAc lepilom, in to pri vseh debelinah furnirjev. Rezultat povezujemo z izrazitejšimi visko-plastičnimi karakteristikami PVAc lepilnih spojev v primerjavi z UF lepilnimi spoji, kar potrjujejo tudi druge študije (Kaboarani in Riedl, 2011).

Preglednica 4 Povprečne vrednosti (Povp.) specifičnega modula elastičnosti, dušenja zvoka, akustičnega koeficienta, akustične učinkovitosti in relativne akustične učinkovitosti za masivni les in slojnat furnirni smrekov les (KV% - koeficient variacije v %)

Preizkušane	Specifični modul elastičnosti [GPa]		Dušenje zvoka		Akustični koeficient [$m^4 s^{-1} kg^{-1}$]		Učinkovitost akustične pretvorbe [$m^4 s^{-1} kg^{-1}$]		Relativna učinkovitost akustične pretvorbe [$km s^{-1}$]	
	Povp.	KV%	Povp.	KV%	Povp.	KV%	Povp.	KV%	Povp.	KV%
K-kontrola	26,0	15,5	0,016	6,2	10,8	12,0	695,8	17,1	324,6	10,5
PV08	23,8	4,6	0,029	7,8	7,8	2,9	267,4	9,0	166,4	9,4
PV14	22,6	13,2	0,027	4,3	8,6	6,6	323,2	10,0	177,7	10,3
PV25	15,8	5,0	0,023	7,9	7,7	8,0	339,1	11,5	173,9	10,3
UF08	21,4	3,5	0,023	5,9	7,2	5,0	317,1	8,3	203,9	7,3
UF14	20,5	21,2	0,021	9,4	7,7	11,1	364,1	19,5	213,9	20,1
UF25	18,5	10,0	0,022	7,6	8,4	5,5	389,1	13,4	197,7	13,0

Izrazito povečanje dušenja mehanskih vibracij pri LVL preizkušancih pa je mogoče pripisati tudi nekaterim drugim vplivnim dejavnikom. Tako je pričakovati pojav prekinjenosti strukture, odklone lesnih vlaken ter mehanske porušitve na lokacijah lepilnih spojev, kar nekatere raziskave omenjajo kot neprimerno pri uporabi lesa v akustične namene (Bremaud in sod., 2011). V raziskavi se sicer podrobno nismo ukvarjali s plastičnimi porušitvami lokalno v bližini lepilnih spojev, ki pa so pogosto prisotne pri lepljenju redkejših lesnih vrst, zlasti na lokacijah ranega lesa (Xue in Hue, 2013). Takšne strukturne spremembe omogočajo večjo disipacijo energije in s tem dušenje mehanskega nihanja LVL preizkušancev.



Slika 11 Kompresijske porušitve LVL iz topolovine na lokaciji lepilnih spojev (levo 10-slojni LVL, desno 11-slojni LVL) (Xue in Hue, 2013)

Primerjava med preizkušanci PV14 in UF14 in kontrolo zopet kaže, da visok delež lepila napram deležu lesa negativno vpliva na akustične lastnosti in sicer je dušenje nihanja pri UF14 večje od kontrolnih preizkušancev za 24 %. Pri preizkušancih PV14 in kontrolnih je razlika v dušenju še večja, ker PVAc negativno vpliva na akustične lastnosti in sicer razlika je 40 % večje dušenje, kot pri masivnem lesu. Primerjava koeficientov dušenja nihanja med PV14 in UF14 kaže 33 % razliko. Zopet se izkazuje dejstvo, da uporaba UF lepila omogoča boljše akustične lastnosti lepljenega lesa. Primerjava vrednosti PV25 in UF25 nam kaže 19 % razliko, UF lepila imajo nižji koeficient dušenja nihanja vendar je razlika precej manjša predvsem zaradi razmerja med količino lepila in količino masivnega lesa v lepljenem lesu.

4.2.2 Vpliv lepljenja lesa na učinkovitost akustične pretvorbe

Iz vidika izdelave inštrumentov sta pogosto odločilna kazalnika za izbiro materiala parametra *ACE* in *RACE*, ki določata količino zvočne energije, ki se emitira v prostor kot posledica mehanskega vzbujanja (Straže in sod., 2015). *ACE* opisuje učinkovitost akustične pretvorbe in je odvisen od elastičnega modula ter gostote preizkušanca, parameter *RACE*, ki tudi kaže učinkovitost pretvorbe mehanske energije v zvočno, pa je neodvisen od gostote materiala.

Primerjava *ACE* vrednosti slojnatega furnirnega lesa in masivnega lesa oziroma kontrolnega vzorca K nam s tem parametrom najbolj očitno prikaže vpliv deleža lepila v razmerju z deležem lesa na akustične lastnosti slojnatega furnirnega lesa. Masivni kontrolni preizkušanec je imel za 44 % boljšo vrednost *ACE*, kot najboljši lepljen preizkušanec UF25. Vse ostale primerjave nam zopet potrjujejo ugotovitev, da so UF lepila bolj primerna za uporabo pri izdelavi lepljenega lesa z dobrimi akustičnimi lastnostmi, kot pa PVAc lepila.

RACE je parameter, ki podobno, kot *ACE* prikazuje efektivnost pretvorbe mehanskega nihanja v zvok, vendar je neodvisen od gostote materiala in nam s tem prikaže, kako strukturne lastnosti preizkušanca vplivajo na akustične lastnosti. Višja, kot je vrednost parametra *RACE*, boljše so akustične lastnosti preizkušanca. V povprečju UF lepila dosegajo vrednost 205, PVAc lepila pa 172,6. Razlika v relativni učinkovitosti akustične pretvorbe je 16 %. UF lepila zopet kažejo boljše akustične lastnosti. Primerjava povprečnih vrednosti med preizkušanci iz lepljenega lesa in preizkušanci iz masivnega lesa prikazuje 42 % razliko. Lahko ugotovimo, da večji, kot je delež lepila v razmerju z deležem lesa slabše so akustične lastnosti preizkušancev.

Podobno kot pri koeficientih *ACE* in *RACE*, tudi pri akustičnem koeficientu *K*, nismo zaznali neposrednim razlik med posameznimi lepljenci po debelinah furnirja, kot tudi glede na vrsto uporabljenega lepila. Osnovna ugotovitev je, da je ta parameter pri LVL preizkušancih prav tako bistveno manjši, kot pa pri masivnem lesu. Visoka vrednost

akustičnega koeficienta pri masivnem lesu kaže na njegove boljše akustične lastnosti, torej ima višje razmerje med specifičnim modulom elastičnosti in koeficientom dušenja zvoka.

5. SKLEPI

Osnovni namen diplomskega dela je bil proučiti razlike v akustičnih lastnostih lepljenega lesa, ožje slojnatega furnirnega lesa, ter masivnega lesa, tudi z vidika uporabe različnih vrst lepila. S fizikalnimi meritvami in z meritvami frekvenčnega odziva pri vzdolžnem in prečnem mehanskem nihanju smo ugotovili, da obstajajo kazalniki, s katerimi lahko preverimo in ločimo akustično kakovost masivnega lesa in LVL preizkušancev.

Osnovne razlike med masivnim lesom in LVL smo potrdili že v gostoti lesa. Najnižja je bila pri masivnem lesu, nato pa narašča s številom furnirnih slojev v preizkušancu, do najvišje vrednosti pri najtanjšem uporabljenem furnirju. Potrdili pa smo tudi razlike med LVL glede na uporabljeno lepilo, saj so vselej višje vrednosti gostote bile dosežene pri uporabi UF lepila.

Hitrost zvoka v vzdolžni smeri se je lepljenjem lesa značilno zmanjšala. Zmanjšanje je bilo najmanjše pri LVL s tankimi furnirnimi listi ($d = 0,8$ mm), bolj izrazito pa pri LVL s srednje debelimi furnirnimi listi, ter pri LVL z najdebelejšimi furnirni listi.

Lepljenje lesa je imelo pozitiven učinek na togost preizkušancev, ki se je povečevala tudi z večanjem števila slojev oz. s tanjšanjem uporabljenega furnirja. Glede togosti pa je bilo lepljenje kvalitetnejše s PVAc lepilom, kot pa z UF lepilom, saj smo pri slednjem dosegli v povprečju 10 % nižje vrednosti modula elastičnosti.

Pričakovano smo z lepljenjem lesa močno poslabšali dušenje mehanskega nihanja preizkušancev. Najvišje dušenje zvoka smo potrdili pri LVL preizkušancih, ki so bili narejeni iz najtanjših furnirnih listov, nekoliko nižje pa pri uporabi debelejšega furnirja. Bistvenih razlik med LVL preizkušancih, zlepljenih z PVAc ali UF lepilom, nismo potrdili.

Bistveno znižanje vrednosti pri LVL preizkušancih v primerjavi z masivnim lesom smo potrdili tudi pri akustičnih parametrih, t.j. pri akustičnem koeficientu K , pri učinkovitosti akustične pretvorbe ACE in pri relativni učinkovitosti akustične pretvorbe $RACE$. Vsi omenjeni parametri so bili slabši pri vseh preizkušancih LVL. Trendov padanja oz. naraščanja z debelino furnirja pa pri teh parametrih nismo potrdili. Prav tako nismo potrdili razlik K , ACE in $RACE$ pri LVL preizkušancih, ki so bili lepljeni z različnima lepiloma.

6. VIRI

- Beranek L. 1986. Acoustics. New York, American Institute of Physics
- Brancheriau L., Kouchade C., Brémaud I. 2010. Internal friction measurement of tropical species by various acoustic methods. *Journal of Wood Science*, 56: 371-379
- Brémaud I., Gril J., Thibaut B. 2011. Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data. *Wood Science and Technology*, 45: 735-754
- Bucur V. 2006. Acoustics of wood. Berlin, Springer Verlag: 393 str.
- Čudina M. 2014. Tehnična akustika – merjenje, vrednotenje in zmanjševanje hrupa in vibracij. Ljubljana, Fakulteta za strojništvo: 322 str
- Divos F. 2005. Relation between static and dynamic modulus elasticity of wood. *Acta Silvae et Ligni Hungarica*, 1: 105-110
- Gorišek Ž. 2009. Les: zgradba in lastnosti: njegova variabilnost in heterogenost. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 178 str.
- Ireneusz B. 2011. Cross and diagonal laminated timber as innovative material for beam elements. Karlsruhe, KIT Scientific Publishing: 134str.
- Jošt M., Šernek M. 2009. Shear strength development of the phenol-formaldehyde adhesive bond during cure. *Wood Science and Technology*, 43, 1/2: 153-166
- Kaboorani A., Riedl B. 2011. Improving performance of polyvinyl acetat (PVA) as a binder for wood by combination with melamine based adhesives. *International Journal of Adhesives and Adhesives*, 31: 605-611
- Kariž M., Šernek M. 2014. Determination of the percentage of wood failure by 3D scanning of the adhesive bondline. *European journal of wood and wood products*, 72, 4: 551-553
- Marra A. 1992. Technology of wood bonding principles. in practice. New York, Van Nostrand Reinhold, 61-90
- Obataya E., Ono T., Norimoto M. 2000. Vibrational properties of wood along the grain. *Journal of Material Science*, 35: 2993-3001
- Ranta-Maunus A. 1995. Laminated veneer lumber and other structural sections. *Timber engineering STEP 1*, A9: 1-7

- Resnik J. 1987. LVL – nova generacija lepljenega lesa za gradbeništvo. Les, 39, 1/2: 25-32
- Resnik J. 1989. Lepila in lepljenje lesa : (okvirna skripta). Ljubljana: Biotehniška fakulteta, VTOZD za lesarstvo, 103 str
- Resnik J. 1990. Raziskava pogojev uporabe sestavljenih izdelkov iz lesa v gradbeništvu. Les, 42, 9/10: 269-274
- Roohnia M., Tajdini A., Manouchehri N. 2011. Assessing wood in sounding boards considering the ratio of acoustical anisotropy. NDT&E International, 44: 13-20
- Seljak M., Šernek M. 2005. Vpliv različne mehanske priprave lepilne površine na kvaliteto lepilnega spoja. Les, 57: 106-110
- 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 for Wood and Wood Products, 77, 2: 235-243
- Šernek M. 1999. Vpliv bistvenih dejavnikov na penetracijo in trdnost UF lepilnega spoja pri lepljenju bukovine. Magistrsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 9-34
- Šernek M. 2005. Visokofrekvenčno lepljene lesa : strokovni seminar. Ljubljana: Center RS za poklicno izobraževanje.
- Šernek M., Jošt M. 2004. Konstrukcijski kompozitni les. Les, 56, 7/8: 230-235
- Šernek M., Kutnar A. 2008. Polivinilacetatna lepila za les. Les, 60, 10: 364-370
- Xue B., Hu Y. 2013. Analysis of the microstructure and mechanical properties of laminated veneer lumber. Bioresources, 8, 2: 2681-2695
- Xu J., Widyorini R., Han G., Kawai S., Sugawara R. 2004. Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. Journal of wood science, 50, 1: 62-67

ZAHVALA

Zahvaljujem se doc.dr.Alešu Stražetu za podporo s svojim znanjem, izkušnjami in voljo do raziskovanja ter profesionalno prijateljski odnos.

Zahvaljujem se recenzentu prof. Dr. Milanu Šerneku za vse kvalitetne usmeritve v procesu izdelave naloge in za vse hitre odzive.

Obema se zahvaljujem za prikazano pojavo strokovnjaka tudi to štejem med usmeritve za nadaljno pot.

Zahvaljujem se tudi mojim staršem za podporo med študijem in vse dane možnosti.

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

ČAMERNIK Boštjan

AKUSTIČNE LASTNOSTI LEPLJENEGA LESA

DIPLOMSKO DELO
Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2016