

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Andrej RAJŠP

**IZBIRA LEPILA ZA IZDELAVO SLOJNATEGA
KOMPOZITA IZ BUKOVEGA FURNIRJA**

DIPLOMSKI PROJEKT

Visokošolski strokovni študij - 1. stopnja

Ljubljana, 2014

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Andrej RAJŠP

**IZBIRA LEPILA ZA IZDELAVO SLOJNATEGA KOMPOZITA IZ
BUKOVEGA FURNIRJA**

DIPLOMSKI PROJEKT
Visokošolski strokovni študij - 1. stopnja

**SELECTING RIGHT GLUE TO MAKE A LAYER COMPOSITE FROM
BEECH VENEER**

B. SC. THESIS
Professional Study Programmes

Ljubljana, 2014

Diplomski projekt je zaključek Visokošolskega strokovnega študija Tehnologije lesa in vlaknatih kompozitov – 1. stopnja. Delo je bilo opravljeno na Katedri za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin, Oddelka za lesarstvo, Biotehniške fakultete, Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Milana Šerneka za recenzenta pa viš. pred. mag. Bogdana Šego.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Diplomski projekt je rezultat lastnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svojega diplomskega projekta na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je projekt, ki sem ga oddal v elektronski obliki, identičen tiskani verziji.

Andrej Rajšp

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dv1
DK	630*824.9
KG	slojnat kompozit/natezno strižna trdnost/poliuretansko lepilo/epoksidno lepilo/poliestrsko lepilo
AV	RAJŠP, Andrej
SA	ŠERNEK, Milan (mentor)/ŠEGA, Bogdan (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2014
IN	IZBIRA LEPILA ZA IZDELAVO SLOJNATEGA KOMPOZITA IZ BUKOVEGA FURNIRJA
TD	Diplomski projekt (Visokošolski strokovni študij - 1. stopnja)
OP	IV, 27 str., 12 pregl., 19 sl., 7 vir.
IJ	sl
Jl	sl/en
AI	Cilj raziskave je bil izbrati najustreznejše lepilo za izdelavo slojnatega kompozita v obliki cevi za kasnejšo izdelavo lesenega kolesa. Ker je proces izdelave zahteven, je bila izbira ustrezne tehnologije in lepila ključna. Izbrali smo 3 lepila, ki naj bi ustrezala z vidika trdnosti in trajnosti, in sicer poliuretansko lepilo Mitopur E45, poliestrsko lepilo Colpoly 7201 ter epoksidno lepilo Epox 210. Najprej smo z vsakim lepilom izdelali lepljenec iz 2 bukovih lamel, iz katerih smo kasneje izžagali preizkušance za ugotavljanje natezno strižne trdnosti lepilnih spojev po standardu SIST EN 205. Pred testiranjem smo preizkušance izpostavili različnim pogojem, kot jih predpisuje standard SIST EN 12765. Ugotovili smo, da je bilo poliuretansko lepilo najprimernejše za lepljenje, saj je v vseh pripravah doseglo najboljše rezultate. Pri epoksidnem lepilu smo imeli težave s prehitro penetracijo v furnir, kar se je odražalo tudi pri rezultatih, saj so nekateri preizkušanci imeli veliko trdnost, medtem ko so nekateri razpadli že pri pripravi. S poliestrskim lepilom smo izmed vseh lepil dosegli najmanjšo trdnost spoja.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND Dv1
DC UDC 630*824.9
CX layer composite/tensile shear strength/polyurethane adhesive/epoxide resin/polyester resin
AU RAJŠP, Andrej
AA ŠERNEK, Milan (supervisor)/ŠEGA, Bogdan (co-advisor)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science
and Technology
PY 2014
TY SELECTING RIGHT GLUE TO MAKE A LAYER COMPOSITE
FROM BEECH VENEER
DT B. Sc. Thesis (Professional Study Programmes)
NO IV, 27 p., 12 tab., 19 fig., 7 ref
LA sl
Al sl/en
AB To build a wooden bicycle we need to make a layer composite from beech veneer. The most critical in this difficult process is a choice of glue. Therefore, we selected 3 the most suitable adhesives: polyurethane adhesive Mitopur E45, polyester resin Colpoly 7201 and epoxide resin Epox 210. We made tests with standard SIST EN 205, which described determination of tensile shear strength of lap joints. First we glued together 2 panels of beech, than we had to cut it to the standardized specimens. Tests were made by the same standard. Before we started with tests, we prepared the specimens with some procedures, which are described in standard SIST EN 12765. We determined that the best glue for our composite was polyurethane glue, which was the best in all the conditions from standard. We had problems with penetration at gluing with epoxide resin. That is clear from results, because some specimens had good results, but others have disintegrated during preparation process. Polyester resin was the worst.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE.....	V
KAZALO SLIK.....	VII
KAZALO PREGLEDNIC.....	VIII
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2 HIPOTEZE	1
1.3 CILJI NALOGE	1
2 PREGLED OBJAV	2
2.1 PREDSTAVITEV LEPIL.....	2
2.1.1 Poliuretansko lepilo (Mitopur E45).....	2
2.1.2 Epoksidna smola (Epox 210)	3
2.1.3 Poliestrska smola (colpoly 7201)	4
2.2 NAČINI TESTIRANJA LEPILNIH SPOJEV	5
2.2.1 Razvrstitev lepil.....	5
2.2.2 Preizkus strižne trdnosti lepilnih spojev.....	6
3 MATERIALI IN METODE	8
3.1 IZBIRA LEPIL	8
3.2 LES – BUKOVINA.....	8
3.3 PRIPRAVA PREIZKUŠANCEV.....	9
3.3.1 Lepljenje lamel	9
3.3.2 Izdelava preizkušancev	10
3.3.3 Priprava preizkušancev za trajnostni razred C1	11
3.3.4 Priprava preizkušancev za trajnostni razred C2	11
3.3.5 Priprava preizkušancev za trajnostni razred C3	12
3.3.6 Priprava preizkušancev za trajnostni razred C4	13
4. REZULTATI.....	14
4.1 POLIURETANSKO LEPILO (MITOPUR E45)	15
4.1.1 Testiranje za trajnostni razred C1.....	15
4.1.2 Testiranje za trajnostni razred C2.....	16
4.1.3 Testiranje za trajnostni razred C3.....	17

4.1.4	Testiranje za trajnostni razred C4.....	18
4.2	EPOKSIDNO LEPILO (EPOX 210).....	19
4.2.1	Testiranje za trajnostni razred C1.....	19
4.2.2	Testiranje za trajnostni razred C2.....	20
4.2.3	Testiranje za trajnostni razred C4.....	21
4.3	POLIESTRSKO LEPILO (COLPOLY 7201).....	22
4.3.1	Testiranje za trajnostni razred C1.....	22
4.3.2	Testiranje za trajnostni razred C2.....	23
5	RAZPRAVA IN SKLEPI.....	24
5.1	RAZPRAVA.....	24
5.1.1	Primerjava lepil pri testiranju za trajnostni razred C1.....	24
5.1.2	Primerjava lepil pri testiranju za trajnostni razred C2.....	25
5.1.3	Primerjava lepil pri testiranju za trajnostni razred C3.....	25
5.1.4	Primerjava lepil pri testiranju za trajnostni razred C4.....	26
5.2	SKLEPI.....	27
6	VIRI.....	28

KAZALO SLIK

Slika 1: Poliuretansko lepilo Mitopur E45	2
Slika 2: Epoksidna smola Epox 210	3
Slika 3: Poliestrska smola Colpoly 7201	4
Slika 4: Shema razžagovanja zlepljenih lamel (SIST EN 205, 2003)	6
Slika 5: Standardiziran preizkušaneec za ugotavljanje strižne trdnosti lepilnega spoja (SIST EN 205, 2003)	7
Slika 6: Stiskalnica pripravljena na stiskanje	10
Slika 7: Nastavitev želenega tlaka na stiskalnici	10
Slika 8: Preizkušanci pripravljeni na testiranje, 10 dni po lepljenju	11
Slika 9: Preizkušanci, ki so bili namočeni 24 h v vodi s temperaturo 20 ± 5 °C	11
Slika 10: Preizkušanci, ki so bili namočeni 3 h v vodi s temperaturo 67 ± 2 °C	12
Slika 11: Preizkušanci, ki so bili namočeni 3 h v vodi s temperaturo 67 ± 2 °C,	12
Slika 12: Preizkušanci, ki so bili namočeni 3 h v vreli vodi,	13
Slika 13: Ugotavljanje strižne trdnosti na testirnem stroju Zwick / Roell 005	14
Slika 14: Primer, ko je prišlo do 50 % deleža loma po lesu (PUR-1-2)	15
Slika 15: Primer, ko je prišlo do čistega loma po lepilnem spoju (pri večini preizkušancev)	16
Slika 16: Primerjava povprečnih strižnih trdnosti izbranih lepil pri trajnostnem razredu C1	24
Slika 17: Primerjava povprečnih strižnih trdnosti izbranih lepil pri trajnostnem razredu C2	25
Slika 18: Primerjava povprečnih strižnih trdnosti izbranih lepil pri trajnostnem razredu C3	25
Slika 19: Primerjava povprečnih strižnih trdnosti izbranih lepil pri trajnostnem razredu C4	26

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Način priprave preizkušancev in zahtevana minimalna trdnost za posamezni trajnostni razred po standardu SIST EN 12765 (SIST EN 12765, 2002)	5
Preglednica 2: Razvrstitev duromernih lepil za les za nekonstrukcijsko	5
Preglednica 3: Parametri lepljenja.....	9
Preglednica 4: Preizkušanci zlepljeni s poliuretanskim lepilom in pripravo za trajnostni razred C1 15	
Preglednica 5: Preizkušanci zlepljeni s poliuretanskim lepilom in pripravo za trajnostni razred C2 16	
Preglednica 6: Preizkušanci zlepljeni s poliuretanskim lepilom in pripravo za trajnostni razred C3 17	
Preglednica 7: Preizkušanci zlepljeni s poliuretanskim lepilom in pripravo za trajnostni razred C4 18	
Preglednica 8: Preizkušanci zlepljeni s epoksidnim lepilom in pripravo za trajnostni razred C1	19
Preglednica 9: Preizkušanci zlepljeni s epoksidnim lepilom in pripravo za trajnostni razred C2	20
Preglednica 10: Preizkušanci zlepljeni s epoksidnim lepilom in pripravo za trajnostni razred C4 ...	21
Preglednica 11: Preizkušanci zlepljeni s poliestrskim lepilom in pripravo za trajnostni razred C1 ..	22
Preglednica 12: Preizkušanci zlepljeni s poliestrskim lepilom in pripravo za trajnostni razred C2 ..	23

1 UVOD

Les je poznan kot relativno lahek gradbeni material, s katerim lahko enostavno dosežemo primerljivo nosilnost kot jo imajo drugi gradbeni materiali (npr. beton, železo, opeka...), še posebej, če iz lesa naredimo lesne kompozite, ki imajo izboljšane lastnosti. Les ima kljub relativno nizki gostoti visoko nosilnost.

Naš končni cilj je izdelava lesenega kolesa (bicikla), ki bi bil primerljiv z najsodobnejšimi kolesi, ki so izdelana iz veliko lažjih materialov, kot sta aluminij in pa predvsem karbon. Če bi okvir naredili iz masivnih struženih palic, ki bi bile votle, bi za primerno trdnost kolesa potrebovali relativno debelo steno. Takšno kolo bi bilo pretežko, saj se ne bi niti približali teži, ki jo dosežejo najboljša kolesa današnjega časa. Kot najboljša alternativa se nam je zdela izdelava kompozita z osnovno strukturo vezane plošče, torej slojnatega kompozita iz furnirja, ki bo v obliki cevi. Ko smo dokončno izoblikovali idejo, kakšen naj bi bil postopek izdelave okvirja kolesa, smo ugotovili, da bo za izdelavo lesene cevi ključna izbira lepila, čemur je tudi posvečen ta diplomski projekt.

Zakaj bi naredili leseno kolo, s katerim bo skoraj nemogoče doseči lastnosti karbonskega? Leseno kolo je bolj ekološko in z izdelavo takšnega kolesa, ki bi bilo primerljivo s sodobnimi bi tudi dokazali, da je les uporaben za izdelavo tehnološko zahtevnih izdelkov.

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Pri izdelavi "lesene cevi", ki bi jo kasneje uporabili za izdelavo kolesa, predstavlja največji izziv sam postopek lepljenja furnirjev. Naša osnovna ideja je bila, da bi furnir z nanešenim lepilom ovijali okoli valja, nato vse skupaj dali v model ter stisnili v stiskalnici. Težava se pojavi pri navijanju furnirja, ker ga je potrebno že med navijanjem čim bolj napeti in ob tem paziti, da se ne pretrga. Od vrste lepila in še zlasti od njegovih reoloških lastnosti je odvisno do kakšnih pomikov slojev furnirja bo prišlo v procesu lepljenja. Velik vpliv na lepljenje bodo imele tudi lastnosti lepila kot so penetracija, zaprti vmesni čas, viskoznost ter hitrost utrjevanja. Ker med tipičnimi lepili za les nismo našli primernega, smo izbrali 3 za lesarstvo manj oz. ne tipična lepila, s katerimi pa bi načeloma lahko lepili tudi les.

1.2 HIPOTEZE

Predvidevamo, da bo trdnost lepilnega spoja odvisna od vrste lepila. Z ugotavljanjem strižne trdnosti spojev bomo določili najprimernejše lepilo za izdelavo lesenih cevi. Ker se v lesarstvu od teh lepil največ uporablja poliuretansko lepilo, pričakujemo, da bo le-to doseglo tudi najvišjo strižno trdnost in da bo le ta ustrezala zahtevam standarda.

1.3 CILJI NALOGE

Z ugotavljanjem natezno strižne trdnosti lepilnih spojev bomo proučili poliuretansko (Mitopur E45), epoksidno (Epox 210) ter poliestrsko (Colpoly 7201) lepilo in izbrali lepilo z najprimernejšimi lastnostmi za izdelavo lesene cevi.

2 PREGLED OBJAV

2.1 PREDSTAVITEV LEPIL

2.1.1 Poliuretansko lepilo (Mitopur E45)

Poliuretanska lepila so v lesarstvu čedalje več v uporabi. Dobimo jih lahko v najrazličnejših oblikah, in sicer kot eno ali dvo – komponentno poliuretansko lepilo, kot termično utrjujoče, reaktivno poliuretansko talilno lepilo, poliuretansko lepilo z vsebnostjo topil, itd.



Slika 1: Poliuretansko lepilo Mitopur E45

Mitopur E45 (Slika 1) je univerzalno enokomponentno poliuretansko lepilo za lepljenje lesa, kovin, umetnih mas in drugih materialov. Lepilo se dobi v tekočem stanju v tubi (Tehnični list Mitopur E45, 01/05).

Dobre lastnosti poliuretanskih lepil (Resnik, 1989):

- dobra oprijemnost,
- visoka trdnost lepilnega spoja,
- temperaturna obstojnost,
- vodoodpornost,
- relativno hitro utrjevanje (hladno ali vroče),
- je brez organskih topil,
- je nevtralnega vonja,
- pri pršenju lepila z vodno meglo se lepilo zapeni (penetrira in utrdi tudi porozne materiale, zapolni reže in neravnine),
- pri minimalnem nanosu brez vodne megle, se lepilo ne zapeni (omogoča lepljenje vidnih spojev in lakiranih površin).

Ima pa lepilo tudi kar nekaj slabih lastnosti, med katerimi so:

- strupenost,
- težavno čiščenje,
- cena.

Nanašanje lepila je relativno zahtevno (predvsem enakomeren nanos po celi površini), potrebujemo pa čisto lepilno površino, na katero nato enostransko nanesemo lepilo in jo poškopimo z vodno meglico. Pri tem je najprimernejša vlažnost lesa 8-15 %, nanos lepila 80-250 g/m², tlak stiskanja pa 3-12 bar.

Časi stiskanja so precej različni, odvisni predvsem od dovajanja vlage (vodna meglica, vlažnost lesa) ter dovajanja toplote. Pri višjih temperaturah in več dodane vlage je odprti čas nekaj minut, čas stiskanja pa od 20 min naprej. Če sistemu ne dovajamo toplote (minimalna $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$) in pa veliko vode pa so odprti časi tudi do nekaj ur, časi stiskanja pa do 24 h. Izdelek lahko nadaljnje obdelujemo po 24 h. Pri delu je obvezna zaščita dihal (Resnik, 1989).

2.1.2 Epoksidna smola (EpoX 210)

Epoksidno lepilo EpoX 210 (Slika 2) je dvokomponentno lepilo, primerno za lepljenje najrazličnejših materialov, predvsem kovin, lesa, kamna, marmorja, betona, stekla ter raznih plastik (razen PE, PP, PTFE). Lepilo se veliko uporablja za izdelke s steklenimi, ogljikovimi in kevlarjevimi vlakni ojačanih elementov, kot so avtomobilski in letalski prototipi, za ulivanje kipov, zalivanje fug pri tlakovcih... Prednosti lepila so visoka natezna in tlačna trdnost, odpornost utrjenega veziva proti vodi, olju in razredčenim kemikalijam. Njegova lastnost je tudi zelo nizka viskoznost, kar lahko pri lepljenju lesa povzroča velike težave s prekomerno penetracijo v les (Resnik, 1989).



Slika 2: Epoksidna smola EpoX 210

Lepilo je sestavljeno iz dveh komponent, ki jih mešamo v razmerju 2:1. Lepilo se po združitvi obeh komponent zelo hitro segreva, še posebej pri večjih količinah mešanice, tako da je odprti čas mešanice pri količini 100 g približno 30 min, pri količini 200 g pa le še 11 min, kar pomeni, da moramo lepilno mešanico uporabiti zelo hitro. Utrjevanje je zaradi tankega lepilnega spoja daljše, in sicer 6-24 h, končno trdnost pa doseže nekje po 24 h. Za lepljenje so potrebne čiste lepilne površine (brez madežev olja, maščob, barve, laka...), ki morajo biti suhe in pa hrapave (pomembno predvsem za kovine). Kot topilo za čiščenje lahko uporabimo bencin, aceton, trikloretilen ipd., madeže pa očistimo dokler so še sveži. Pri uporabi je priporočljiva uporaba rokavic (Tehnični list EpoX 210).

2.1.3 Poliestrska smola (colpoly 7201)

Poliestri so produkti estrenja organskih kislin z večvalentnimi alkoholi. Nenasičeni poliestri in kopoliestri so osnova za talilna lepila. Nasičeni poliestri, katerih utrjevanje poteka na osnovi polikondenzacije in polimerizacije, so tipični dvokomponentni sistemi. Glede na sestavo izhodiščnih komponent in potek reakcije kondenzacije je mogoče vplivati na lastnosti lepilnega filma. Zamreženi poliestri so glede na termomehansko obnašanje duromeri, linearni pa termoplasti (Resnik, 1989).

Poliestrska smola Colpoly 7201 (Slika 3) je v osnovi namenjena ročnemu ali strojnemu laminiranju s stekleno armaturo (matta, roving, tkanina). Možne so tudi druge ojačitve ter kombinacije z različnimi polnili in obarvanje smole s Colpoly niansirnimi pastami. Colpoly 7201 je trikomponentno lepilo, ki ga sestavljajo nepospešena smola, ki je v dobavni obliki raztopina nenasičene poliestrske smole v stirenu, brez dodatka pospeševalca. Druga komponenta je pospeševalec, ki ga dodamo 1-2 %, ter ga najprej vmešamo šele nato pa dodajamo še tretjo komponento. Kot zadnjo komponento pa dodamo še katalizator, ki ga mora biti 1-2,5 %. Katalizatorja dodamo v primeru nižjih temperatur več, pri višjih temperaturah pa manj ter odvisno od zelenega časa želiranja, dodamo pa ga tik pred uporabo. Če želimo čas želiranja podaljšati, lahko dodamo tudi 0,1-1 % Colpoly inhibitorja. Razmerja morajo biti odmerjena zelo natančno, če želimo, da lepilo doseže optimalno trdnost. V primeru, ko je to nujno potrebno, jo lahko redčimo, ampak samo s dodajanjem 1-3 % Colpoly razredčila (stiren). Mešanico moramo pripravljati sproti, in sicer toliko kot je bomo porabili v cca. 15-20 minutah. Priporočljiva temperatura je 18-25 °C. Pri delu z poliestri je tudi zahtevana uporaba zaščitnih rokavic, maske za zaščito pred vdihovanjem škodljivih hlapov ter očala za zaščito oči.



Slika 3: Poliestrska smola Colpoly 7201

2.2 NAČINI TESTIRANJA LEPILNIH SPOJEV

2.2.1 Razvrstitev lepil

Standard SIST EN 12765 podaja razvrstitev duromernih lepil za les za nekonstrukcijsko uporabo. Ta standard smo uporabili za pripravo preizkušancev na testiranje strižne trdnosti.

Razvrstitev lepil, ki jo podaja standard SIST EN 12765 (SIST EN 12765, 2002) temelji na testiranju strižnih preizkušancev po metodi, ki je opisana v standardu SIST EN 205. V standardu SIST EN 12765 so definirani načini priprave preizkušancev na testiranje, podane so zahteve glede tega kolikšna mora biti trdnost za kateri razred (Preglednica 1) ter v kakšnih pogojih lahko uporabljamo izdelek zlepljen s temi lepili (

Preglednica 2).

Preglednica 1: Način priprave preizkušancev in zahtevana minimalna trdnost za posamezni trajnostni razred po standardu SIST EN 12765 (SIST EN 12765, 2002)

Način priprave		Trajnostni razredi Trdnost lepilnega spoja [N/mm ²]			
Št.	Trajanje in pogoji	C1	C2	C3	C4
1	7 dni v standardni klimi	≥ 10	≥ 10	≥ 10	≥ 10
2	7 dni v standardni klimi 1 dan v vodi 20 ± 5 °C	-	≥ 7	≥ 7	≥ 7
3	7 dni v standardni klimi 3 h v vodi 67 ± 2 °C 2 h v vodi 20 ± 5 °C	-	-	≥ 4	-
4	7 dni v standardni klimi 3 h v vreli vodi 2 h v vodi 20 ± 5 °C	-	-	-	≥ 4
Opomba 1: morda je potrebno daljše kondicioniranje v standardni klimi, odvisno od navodil proizvajalca lepila.					
Opomba 2: ni potrebno, da lepilo razvrstimo v določen trajnostni razred, saj ga lahko razvrstimo tudi v več razredov.					
1 dan = 24 h					
Standardna klima: 20±2 °C in 65±5 % relativna zračna vlažnost oz. 23±2 °C in 50±5 % relativna zračna vlažnost					
Za posamezen trajnostni razred morajo biti trdnosti takšne kot so podane v preglednici. V primeru trajnostnega razreda C4 ni potrebnega 3. preizkusa.					

Preglednica 2: Razvrstitev duromernih lepil za les za nekonstrukcijsko

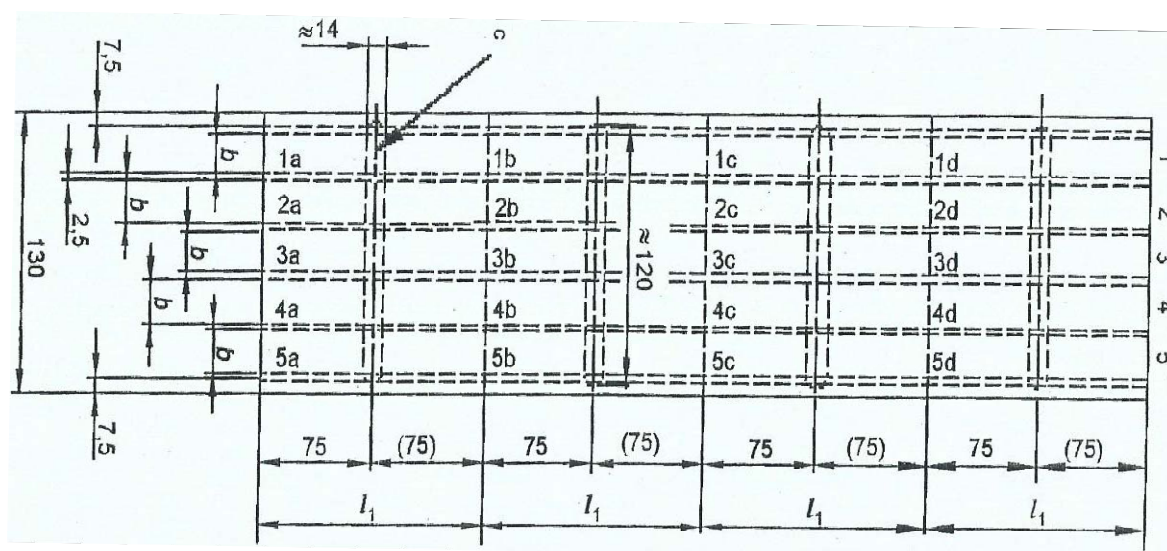
Trajnostni razred	Področje uporabe in primer klimatskih pogojev
C1	Notranja uporaba, kjer je ravnovesna vlažnost lesa (ur) < 15 %
C2	Notranja uporaba z občasnimi kratkotrajnimi izpostavitvami kondenzirani vodi in/ali občasni visoki RZV, kjer je (ur) < 18 %.
C3	Notranja uporaba s pogostimi kratkotrajnimi izpostavitvami tekoči ali kondenzirani vodi in/ali visoki RVZ. Zunanja uporaba v pokritih prostorih
C4	Notranja uporaba s pogostimi dolgotrajnimi izpostavitvami tekoči ali kondenzirani vodi. Zunanja uporaba, kjer so

	izdelki izpostavljeni neposrednim vremenskim vplivom, vendar morajo biti površinsko zaščiteni.
--	--

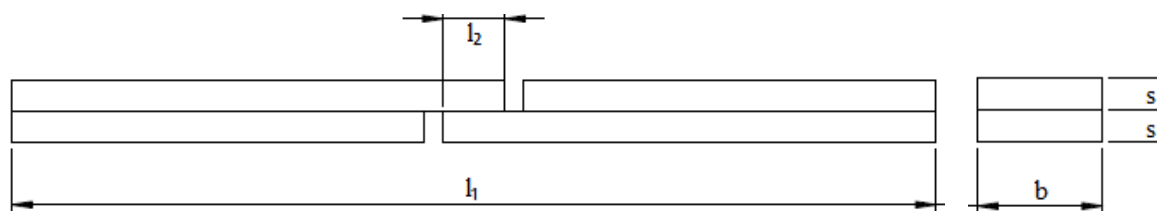
2.2.2 Preizkus strižne trdnosti lepilnih spojev

Za preizkus trdnosti lepilnih spojev lepljencev, ki smo jih zlepili z našimi lepili, smo uporabili standard SIST EN 205, ki predpisuje način ugotavljanja natezno strižne trdnosti spojev s preklpom.

Po standardu SIST EN 205 (SIST EN 205, 2003) preizkušance pripravimo iz dveh v standardni klimi uravnovešenih lamel iz ne parjene bukovine (*Fagus sylvatica* L.) z gostoto $700 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ in vlažnostjo $12 \pm 1 \%$. Dovoljeno je, da sta ti lameli iz različnih desk, razen če želimo pri testiranju čim manjšo razliko med obema lamelama. Zaželen kot med letnicami in površino je med 30° in 90° . Lamele, ki jih nato zlepimo morajo biti dolge vsaj 300 mm in široke vsaj 130 mm, da nam ostane dovolj nad-mere pri razžagovanju (Slika 4). Debelina ene lamele pri tankem lepilnem spoju (debelina spoja do 0,1 mm) mora biti $5,0 \pm 0,1 \text{ mm}$. Število preizkušancev mora biti tolikšno, da zagotavlja minimalno 10 veljavnih meritev.



Slika 4: Shema razžagovanja zlepljenih lamel (SIST EN 205, 2003)



Slika 5: Standardiziran preizkušaneec za ugotavljanje strižne trdnosti lepilnega spoja (SIST EN 205, 2003)

Legenda:

- $l_1 = 150 \pm 5$ mm: dolžina preizkušanca
- $l_2 = 10,0 \pm 0,2$ mm: dolžina ploskve kjer se meri strižna trdnost
- $b = 20,0 \pm 0,2$ mm: širina preizkušanca in ploskve kjer se meri strižna trdnost
- $s = 5$ mm: debelina lamele

- nad-mere primerne za žagin list debeline 2,5 mm

3 MATERIALI IN METODE

3.1 IZBIRA LEPIL

Ker bi moral biti furnir čim tanjši, premer cevi pa tudi ne bo velik, se pojavljajo težave s pokanjem furnirja, še posebej ker je le-tega treba tudi čim bolj na tesno oviti okoli valja. Zato smo prišli do sklepa, da mora imeti lepilo naslednje lastnosti:

- visoko viskoznost,
- počasno penetracijo,
- dolg odprti in zaprti vmesni čas,
- čim krajši čas stiskanja,
- imeti mora visoko trdnost tudi kadar nastanejo debelejši lepilni spoji.

Izbrali smo tri lepila: poliuretansko, poliestrsko ter epoksidno. Predstavnike teh lepil smo izbrali glede na ponudbo na slovenskem trgu.

3.2 LES – BUKOVINA

Drevesna vrsta, ki smo jo predvideli za izdelavo lesenih cevi in ki je tudi predvidena v standardu za preskušanje lepil, je bukovina.

Bukovina (Čufar, 2006) je ne posebej dekorativen rdečkastobel les, normalno brez obarvane jedrovine. Pri starejših drevesih se navadno na prečnem prerezu pojavlja nepravilno oblikovan, rdečerrjav diskoloriran les imenovan "rdeče srce". Za rdeče srce je značilno močno otiljenje trahej, ki med drugim otežuje impregnacijo lesa. Branike so razločne, saj je kasni les z manj trahejami nekoliko temnejši od ranega. Traheje velikosti cca. 100 µm so razporejene difuzno in so v prerezu vidne z lupo. Za bukev so zelo značilni številni široki trakovi, ki so na tangencialni površini vidni kot rdečkasta vretenca, na radialni pa kot očitna, do več milimetrov visoka zrcalca, ki zelo vplivajo na videz lesa. Bukovina nima specifičnega vonja ali okusa.

Bukovina ima visoko gostoto, les je trd in se zelo krči in nabreka. Stabilnost je neugodna, trdnostne lastnosti pa so glede na gostoto nadpovprečno visoke, saj ima dobro upogibno trdnost, med tem ko je pa elastičnost nekoliko nižja, po parjenju pa se tudi upogiba dobro. Les je zelo trd, trden in žilav. Nezaščiten bukovina je zelo podvržena okužbi z glivami in insekti in je le zmerno trajna, se pa z izjemo rdečega srca zelo dobro impregnira, tako da se impregnirana z kreozotnim oljem uporablja tudi za železniške pragove, kjer doživi tudi do 40 let.

Bukovino se veliko pari zaradi zmanjšanja notranjih napetosti in izenačenja barve. Tako se po parjenju zmanjša nevarnost pokanja in zvijanja, les pa dobi enakomerno rdečkasto barvo. Pri sušenju pa se zaradi nevarnosti zvijanja, pokanja, diskoloracij, ipd. uporablja blag režim. Ročno in strojno je bukovino mogoče lepo obdelovati, lušči in reže za furnir se zelo lepo, tudi za struženje in poliranje je zelo primerna. Žeblija in vijači se z lahkoto, dobro drži vijake, pred vijačenjem pa je priporočljiva uvajalna luknja. Površinsko se brez težav obdeluje z vsemi komercialnimi laki.

Na trgu se ločeno prodaja ne parjena in parjena bukovina, sicer pa so na razpolago hlodovina, žagan les, furnirji, vezan les in razni polizdelki. Uporaba je raznovrstna, največ pa za gradbeno mizarstvo, stopnice, opaže, parket, pohištvo, pri čemer se uporablja masiven, krivljen ali vezan les. Najpogostejši izdelki iz bukovine so razne srednje obremenjene predvsem notranje konstrukcije, za delavniške mize, ročaje orodij, aparatur, omar, igrače, embalažo, stružene izdelke, ipd. Najbolj znan izdelek je Thonetov stol, ki ga izdelujejo že okrog 150 let.

Lastnosti bukovine izražene v številkah:

- Gostota $\rho_0 = 490 \dots 680 \dots 880 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{15} = 540 \dots 720 \dots 910 \text{ kg/m}^3$
- E-modul – upogibni = 16000 N/mm^2
- Tlačna trdnost = 60 N/mm^2
- Upogibna trdnost = 120 N/mm^2
- Natezna trdnost = 135 N/mm^2
- Krčenje od svežega do abs. suhega stanja: vzdolžno = 0,3 %; tangencialno = 11,8 %; radialno = 5,8 %; volumsko = $14,0 \dots 17,9 \dots 21,0 \%$

3.3 PRIPRAVA PREIZKUŠANCEV

Preizkušance smo pripravili na način, kot to predpisujeta standarda SIST EN 12756 in SIST EN 205.

3.3.1 Lepljenje lamel

Lepljenje preizkušancev je potekalo v prostoru z standardno klimo ($23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}/50 \pm 5 \%$). Najprej smo bukovne lamele poskobljali na debelino 5 mm. Nato smo zmešali potrebno količino lepila (Preglednica 3), ter nanесли primerno količino lepila na eno lamelo, ter z lopatico enakomerno razporedili čez vso lamelo. Ko smo to naredili na vseh spodnjih lamelah smo jih pokrili z vrhnjimi ter položili v stiskalnico. Nato smo nastavili primeren tlak na stiskalnici (Slika 7) ter stisnili za predviden čas stiskanja. Na koncu smo pustili lamele tudi še v prostoru z standardno klimo en dan, da so spoji dokončno utrdili, tako da smo z nadaljnjo obdelavo začeli čez nekaj dni.

Preglednica 3: Parametri lepljenja

Lepilo	Nanos	Nanos na lamelo	Količina zamešanega lepila	Tlak stiskanja	Čas tiskanja
	g/m^2	g/lam.	g	bar	h
Poliuretansko lepilo	250	9,75	priprava mešanice ni potrebna	8	2
Poliestrsko lepilo	450	17,55	90	7	24
Epoksidno lepilo	300	11,7	70	7,5	24



Slika 6: Stiskalnica pripravljena na stiskanje



Slika 7: Nastavitev zelenega tlaka na stiskalnici

3.3.2 Izdelava preizkušancev

Ko so bili lepljenci pripravljene za nadaljnjo obdelavo, smo jih na krožnem žagalnem stroju razžagali v preizkušance. Zlepljene lamele smo razžagali glede na shemo (Slika 4). Najprej smo jih razžagali na kose dolžine 150 mm (končno dolžino preizkušancev), nato smo naredili utore, na koncu pa še razžagali na končno širino 20 mm, tako da smo dobili preizkušance kot jih predvideva standard (Slika 5). Pri tem smo vse preizkušance tudi sproti označevali. Celotna oznaka je bila sestavljena iz oznake vrste lepila, oznake načina priprave preizkušancev in zaporedne številke.

3.3.3 Priprava preizkušancev za trajnostni razred C1

Ti preizkušanci so pred testiranjem 14 dni stali v prostoru (Slika 8) s standardno klimo ($23\pm 2^{\circ}\text{C}$, $50\pm 5\%$ relativna zračna vlažnost). Sicer je v standardu predviden čas 7 dni, dopušča pa tudi daljši čas, saj le ta ne vpliva na rezultate (SIST EN 12756, 2002).



Slika 8: Preizkušanci pripravljeni na testiranje, 10 dni po lepljenju

3.3.4 Priprava preizkušancev za trajnostni razred C2

Preizkušanci za trajnostni razred C2 so najprej bili pripravljeni enako kot preizkušanci za trajnostni razred C1, dodatno pa smo jih še za 24 h namočili v vodo z $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ (Slika 9). Pri tem smo morali paziti, da so vsi preizkušanci bili v celoti pod vodno gladino. Zaradi logistično enostavnejšega dela smo sprejeli kompromis, znotraj katerega smo začeli s testiranjem prvih preizkušancev 20 minut pred, z zadnjimi pa smo končali približno 20 minut po predvidenem času (SIST EN 12756, 2002).



Slika 9: Preizkušanci, ki so bili namočeni 24 h v vodi s temperaturo $20\pm 5^{\circ}\text{C}$

3.3.5 Priprava preizkušancev za trajnostni razred C3

Preizkušance za trajnostni razred C3 smo prav tako najprej pripravljali enako kot za trajnostni razred C1. Nato smo jih za 3 h namočili v vodo s temperaturo $67\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Slika 10, Slika 11). Na koncu smo jih dali še v hladno vodo s temperaturo $20\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, kjer so se ohladili na temperaturo primerno za testiranje. Tudi tukaj smo sprejeli kompromis, tako da smo prve preizkušance začeli testirati po 1 h in 40 min hlajenja, med tem ko smo zadnje testirali ko so bili v vodi za ohlajanje že približno 2 h in 15 min (SIST EN 12756, 2002).



Slika 10: Preizkušanci, ki so bili namočeni 3 h v vodi s temperaturo $67\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$



Slika 11: Preizkušanci, ki so bili namočeni 3 h v vodi s temperaturo $67\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,
ob prelaganju v hladno vodo nekateri tudi že razpadejo

3.3.6 Priprava preizkušancev za trajnostni razred C4

Pri preizkušancih za trajnostni razred C4 smo zopet najprej opravili postopek za trajnostni razred C1, nato pa za 3 h preizkušance namočili v vrelo vodo (Slika 12). Na koncu smo jih dali še v vodo s temperaturo 20 ± 5 °C, kjer so se ohladili na temperaturo primerno za testiranje. Tudi tukaj smo sprejeli kompromis, tako da smo prve preizkušance začeli testirati po 1 h in 40 min hlajenja, med tem ko smo zadnje testirali, ko so bili v vodi za ohlajanje že približno 2 h in 15 min (SIST EN 12756, 2002).



Slika 12: Preizkušanci, ki so bili namočeni 3 h v vreli vodi, veliko jih je že med kuhanjem razpadlo

4. REZULTATI

S testiranjem različnih lepil smo želeli ugotoviti katero je najprimernejšo za izdelavo slojnatega cevastega kompozita. Pri testiranju standardiziranih preizkušancev smo s pomočjo natezno - strižne napetosti ugotovili maksimalno strižno trdnost, preizkušanci pa so pred testiranjem bili izpostavljeni tudi različnim pogojem.

Rezultate smo dobili s pomočjo testirnega stroja Zwick / Roell 005 (Slika 13) in upoštevanjem 2 standardov, in sicer SIST EN 12765 in SIST EN 205. Za vse podane rezultate velja naslednja razlaga oznak:

- b = širina lepilnega spoja, kjer smo merili strižno trdnost (Slika 2),
- l_2 = dolžina lepilnega spoja, na kateri smo merili strižno trdnost (Slika 2),
- A = površina lepilnega spoja, na kateri se meri strižno trdnost,
- t = čas od začetka delovanja sile in do,
- $F_{\max}$ = sila pri kateri je prišlo do loma,
- τ = strižna trdnost,
- L_{pl} = delež loma po lesu.



Slika 13: Ugotavljanje strižne trdnosti na testirnem stroju Zwick / Roell 005

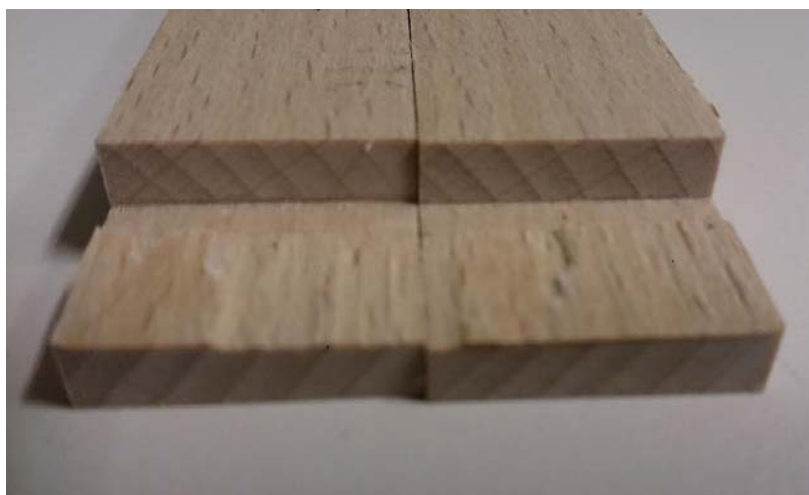
4.1 POLIURETANSKO LEPILO (MITOPUR E45)

4.1.1 Testiranje za trajnostni razred C1

Preglednica 4: Preizkušanci zlepljeni s poliuretanskim lepilom in pripravo za trajnostni razred C1

Preizkušanec	b	l ₂	A	t	F _{max}	τ	Lpl
	mm	mm	mm ²	s	N	N/mm ²	%
PUR-1-1	20,2	10,5	212	20,92	2680	12,6	0
PUR-1-2	20,2	10,4	210	16,55	2830	13,5	50
PUR-1-3	20,2	10,5	212	16,67	3000	14,1	0
PUR-1-4	20,2	10,4	210	17,13	3080	14,7	0
PUR-1-5	20,2	10,4	210	31,61	3110	14,8	75
PUR-1-6	20,2	10,4	210	16,18	2850	13,6	0
PUR-1-7	20,2	10,4	210	15,3	2750	13,1	0
PUR-1-8	20,2	10,4	210	31,4	3110	14,8	25
PUR-1-9	20,2	10,4	210	46,13	3290	15,6	25
PUR-1-10	20,1	10,4	209	16,11	2940	14,1	0
povp.						14,1	17,5
min.						12,6	0
max.						15,6	75
st. odklon						0,91	26,48

Pri testiranju za trajnostni razred C1 mora biti strižna trdnost ≥ 10 N/mm². Iz preglednice 4 je razvidno, da so vsi preizkušanci to mejo presegli, in sicer za 26 – 56 %. Tudi povprečje kaže na močno preseganje teh rezultatov, in sicer za 41 %. Standardni odklon je bil relativno majhen, torej lahko ugotovimo, da so rezultati kvalitetni. Edina izjema je delež loma po lesu (Slika 14), kjer lahko opazimo nekaj izjem, ki so izstopale v pozitivno smer.



Slika 14: Primer, ko je prišlo do 50 % deleža loma po lesu (PUR-1-2)

4.1.2 Testiranje za trajnostni razred C2

Preglednica 5: Preizkušanci zlepljeni s poliuretanskim lepilom in pripravo za trajnostni razred C2

Preizkušanec	b	l ₂	A	t	F _{max}	τ	Lpl
	mm	mm	mm ²	s	N	N/mm ²	%
PUR-2-3	20,2	10,4	210	20,89	1150	5,46	0
PUR-2-4	20,2	10,5	212	14,66	1230	5,78	0
PUR-2-5	20,2	10,3	208	12,79	1100	5,28	0
PUR-2-6	20,2	10,4	206	19,43	1210	5,88	0
PUR-2-7	20,2	10,4	206	15,34	1470	7,14	0
PUR-2-8	20,2	10,4	210	15,88	1520	7,26	0
PUR-2-9	20,2	10,4	210	11,83	1020	4,87	0
PUR-2-11	20,2	10,3	208	12,88	1150	5,53	0
PUR-2-12	20,2	10,4	210	14,58	1480	7,05	0
PUR-2-13	20,1	10,4	209	15,66	1320	6,29	0
povp.						6,05	0
min.						4,87	0
max.						7,26	0
st. odklon						0,84	0

Pri testiranju za trajnostni razred C2 mora biti strižna trdnost ≥ 7 N/mm². Iz preglednice 5 je razvidno, da so le trije preizkušanci le-to tudi dosegli. Povprečje strižne trdnosti je sicer 6,05 N/mm², kar pa je za 14 % pod mejo, torej kar občutno prenizko, meritev z najnižjo trdnostjo pa odstopa celo za več kot 30 %. Standardni odklon je sicer bil relativno majhen. Pri deležu loma po lesu lahko opazimo, da je pri vseh preizkušancih prišlo do loma znotraj lepilnega spoja (Slika 15), kar glede na nizke strižne trdnosti ni presenetljivo.



Slika 15: Primer, ko je prišlo do čistega loma po lepilnem spoju (pri večini preizkušancev)

4.1.3 Testiranje za trajnostni razred C3

Preglednica 6: Preizkušanci zlepljeni s poliuretanskim lepilom in pripravo za trajnostni razred C3

Preizkušanec	b	l ₂	A	t	F _{max}	τ	Lpl
	mm	mm	mm ²	s	N	N/mm ²	%
PUR-3-1	20,2	10,4	210	12,12	1070	5,11	0
PUR-3-2	20,2	10,4	210	13,95	1100	5,22	0
PUR-3-3	20,2	10,4	210	20,69	1110	5,3	0
PUR-3-4	20,1	10,4	209	14,33	800	3,83	0
PUR-3-5	20,1	10,4	209	14,88	1450	6,95	0
PUR-3-6	20,2	10,3	208	14,34	1280	6,17	0
PUR-3-8	20,2	10,3	208	12,19	1060	5,1	0
PUR-3-9	20,2	10,3	208	12,39	1070	5,13	0
PUR-3-10	20,2	10,4	210	13,52	1380	6,55	0
PUR-3-11	20,2	10,4	210	19,9	1120	5,35	0
povp.						5,47	0
min.						3,83	0
max.						6,95	0
st. odklon						0,88	0

Pri testiranju za trajnostni razred C3 mora biti strižna trdnost ≥ 4 N/mm². Iz preglednice 6 je razvidno, da so, z izjemo "PUR-3-4", ki močno odstopa in je bil tik pod mejo, vsi preizkušanci to mejo tudi dosegli oz. jo kar močno tudi presegli. Povprečje strižne trdnosti je 5,47 N/mm², kar je 36,75 % nad minimalno mejo, med tem ko je najvišja vrednost to mejo presegla za kar 73,75 %. Standardni odklon je sicer bil relativno majhen, kar potrjuje dobre rezultate. Pri deležu loma po lesu lahko opazimo, da je pri vseh preizkušancih prišlo do loma znotraj lepilnega spoja (Slika 16), kar je glede na nizke strižne trdnosti pričakovano.

4.1.4 Testiranje za trajnostni razred C4

Preglednica 7: Preizkušanci zlepljeni s poliuretanskim lepilom in pripravo za trajnostni razred C4

Preizkušanec	b	l ₂	A	t	F _{max}	τ	Lpl
	mm	mm	mm ²	s	N	N/mm ²	%
PUR-4-1	20,1	10,3	207	12,7	1230	5,96	0
PUR-4-2	20,2	10,4	210	14,55	1310	6,22	0
PUR-4-3	20,2	10,4	210	14,09	1370	6,53	0
PUR-4-4	20,1	10,4	209	16,96	1000	4,81	0
PUR-4-5	20,2	10,3	210	12,58	1150	5,45	0
PUR-4-6	20,2	10,4	210	16,35	1220	5,79	0
PUR-4-7	20,1	10,5	211	14,22	1300	6,16	0
PUR-4-8	20,1	10,4	209	14,96	1300	6,24	0
PUR-4-9	20,2	10,4	210	13,72	1220	5,78	0
PUR-4-10	20,2	10,4	210	12,8	1150	5,49	0
povp.						5,84	0
min.						4,81	0
max.						6,53	0
st. odklon						0,50	0

Pri testiranju za trajnostni razred C4 mora biti strižna trdnost ≥ 4 N/mm². Iz preglednice 7 je razvidno, da so vsi preizkušanci to mejo tudi presegli. Povprečje strižne trdnosti je 5,84 N/mm², kar je za 46 % nad minimalno mejo, kar pomeni, da so rezultati v povprečju dobri. Tudi preizkušanec z najnižjo trdnostjo je mejo kar precej presegel (20,25 %), najvišja vrednost pa je bila za kar 63 %. Standardni odklon je sicer bil relativno majhen. Pri deležu loma po lesu lahko opazimo, da je pri vseh preizkušancih prišlo do loma znotraj lepilnega spoja (Slika 15), kar je glede na nizke strižne trdnosti pričakovano.

4.2 EPOKSIDNO LEPILO (EPOX 210)

4.2.1 Testiranje za trajnostni razred C1

Preglednica 8: Preizkušanci zlepljeni s epoksidnim lepilom in pripravo za trajnostni razred C1

Preizkušanec	b	l ₂	A	t	F _{max}	τ	Lpl
	mm	mm	mm ²	s	N	N/mm ²	%
EP-1-1	20,1	10,3	207	19,05	2700	13,1	0
EP-1-3	20,2	10,4	210	11,71	1830	8,72	0
EP-1-4	20,2	10,4	210	22,31	2080	9,89	0
EP-1-5	20,2	10,4	210	12,57	2050	9,75	0
EP-1-6	20,2	10,4	210	12,93	1990	9,48	0
EP-1-7	20,2	10,4	210	10,23	1570	7,48	0
EP-1-8	20,2	10,4	210	23,04	2070	9,84	25
EP-1-9	20,2	10,4	210	26,63	1730	8,22	0
EP-1-10	20,2	10,4	210	21,48	2160	10,3	0
EP-1-11	20,2	10,4	210	13,87	2410	11,5	0
povp.						9,8	3
min.						7,48	0
max.						13,1	25
st. odklon						1,60	8

Pri testiranju za trajnostni razred C1 mora biti strižna trdnost ≥ 10 N/mm². Iz preglednice 8 je razvidno, da so le trije preizkušanci le-to tudi dosegli, med tem ko so kar štirje preizkušanci bili za manj kot 5 % pod to mejo. Povprečje strižne trdnosti je bilo 9,8 N/mm², kar je le 2 % pod mejo, torej soliden rezultat, ki pa vendarle ne dosega minimuma predpisanega v standardu. Standardna odklona strižne trdnosti in sile loma sta relativno velika, kar je predvsem posledica preizkušanca "EP-1-1", ki močno odstopa navzgor (30 %) in pa preizkušanca "EP-1-7", ki za kar 25 % odstopa navzdol. Pri deležu loma po lesu je edina izjema preizkušanec "EP-1-8", pri ostalih preizkušancih pa je prišlo do loma znotraj lepilnega spoja (Slika 15), kar glede na nizke strižne trdnosti ni presenetljivo.

4.2.2 Testiranje za trajnostni razred C2

Preglednica 9: Preizkušanci zlepljeni s epoksidnim lepilom in pripravo za trajnostni razred C2

Preizkušanec	b	l_2	A	t	$F_{\max}$	τ	Lpl
	mm	mm	mm ²	s	N	N/mm ²	%
EP-2-1	20,2	10,3	208	9,51	58,8	0,28	0
EP-2-2	20,2	10,4	210	8,97	783	3,73	0
EP-2-3	20,2	10,4	210	8,77	672	3,2	0
EP-2-4	20,1	10,4	209	10,85	937	4,48	0
EP-2-5	20,2	10,5	212	3,95	203	0,96	0
EP-2-6	20,2	10,4	210	7,44	582	2,77	0
EP-2-7	20,2	10,4	210	10,13	521	2,48	0
EP-2-8	20,2	10,4	210	13,85	660	3,14	0
EP-2-9	20,2	10,4	210	9,61	194	0,92	0
EP-2-10	20,1	10,3	207	9,17	793	3,83	0
povp.						2,6	0
min.						0,28	0
max.						4,48	0
st. odklon						1,41	0

Pri testiranju za trajnostni razred C2 mora biti strižna trdnost ≥ 7 N/mm². Iz preglednice 9 je razvidno, da noben preizkušanec ne dosega minimalne strižne trdnosti. Standardna odklona strižne trdnosti in sile loma sta relativno velika, kar je predvsem posledica zelo nizke trdnosti več preizkušancev. Pri deležu loma po lesu lahko opazimo, da je pri vseh preizkušancih prišlo do loma znotraj lepilnega spoja (Slika 15), kar je glede na nizke strižne trdnosti pričakovano.

4.2.3 Testiranje za trajnostni razred C4

Preglednica 10: Preizkušanci zlepljeni s epoksidnim lepilom in pripravo za trajnostni razred C4

Preizkušanec	b	l_2	A	t	$F_{\max}$	τ	Lpl
	mm	mm	mm ²	s	N	N/mm ²	%
EP-4-1	20,1	10,4	209	11,2	130	0,62	0
EP-4-2	20,2	10,4	210	7,22	20,9	0,10	0
EP-4-3	20,1	10,4	209	20,42	660	3,16	0
EP-4-4	20,1	10,4	209	12,26	493	2,36	0
EP-4-5	20,1	10,5	211	9,28	670	3,18	0
EP-4-6	20,2	10,5	212	15,98	691	3,26	0
EP-4-7	20,1	10,4	209	7,68	430	2,06	0
EP-4-8	20,1	10,4	209	11,88	603	2,89	0
EP-4-9	20,2	10,4	210	2,14	0	0	0
EP-4-10	20,1	10,5	211	1,59	0	0	0
povp.						1,76	0
min.						0,00	0
max.						3,26	0
st. odklon						1,42	0

Pri testiranju za trajnostni razred C4 mora biti strižna trdnost ≥ 4 N/mm². Iz preglednice 10 je razvidno, da noben preizkušanec ne dosega minimalne strižne trdnosti, prav tako je povprečje daleč od zahteve standarda, dva preizkušanca pa sta celo razpadla že pred začetkom delovanja sile (slika 11). Standardna odklona strižne trdnosti in sile loma sta relativno velika, kar je predvsem posledica zelo nizke trdnosti več preizkušancev ter slabega lepilnega spoja. Pri deležu loma po lesu lahko opazimo, da je pri vseh preizkušancih prišlo do loma znotraj lepilnega spoja (Slika 15), kar je glede na nizke strižne trdnosti pričakovano.

Testiranja za trajnostni razred C3 nismo izvedli, ker so vsi preizkušanci razpadli med pripravo. Zaključimo lahko, da je bila strižna trdnost epoksidnega lepilnega spoja v tem primeru praktično enaka nič.

4.3 POLIESTRSKO LEPILO (COLPOLY 7201)

4.3.1 Testiranje za trajnostni razred C1

Preglednica 11: Preizkušanci zlepljeni s poliestrskim lepilom in pripravo za trajnostni razred C1

Preizkušanec	b	l ₂	A	t	F _{max}	τ	Lpl
	mm	mm	mm ²	s	N	N/mm ²	%
PE-1-1	20,1	10,4	209	8,54	1290	6,15	0
PE-1-2	20,1	10,4	209	9,93	1530	7,3	0
PE-1-3	20,1	10,5	211	11,14	1780	8,45	0
PE-1-4	20,2	10,4	210	10,82	1720	8,18	0
PE-1-5	20,1	10,4	209	9,65	1520	7,26	0
PE-1-6	20,2	10,3	208	9,56	1480	7,1	0
PE-1-7	20,2	10,3	208	8,92	1350	6,48	0
PE-1-8	20,2	10,4	210	9,62	1490	7,09	0
PE-1-9	20,2	10,4	210	11,43	1910	9,08	0
PE-1-10	20,2	10,4	210	10,71	1600	7,62	0
povp.						7,5	0
min.						6,15	0
max.						9,08	0
st. odklon						0,89	0

Pri testiranju za trajnostni razred C1 mora biti strižna trdnost ≥ 10 N/mm². Iz preglednice 11 je razvidno, da noben preizkušanec ne dosega minimalne strižne trdnosti, prav tako je povprečje daleč od zahteve standarda (na 75 %), med tem ko se je najboljši preizkušanec približal na 90 %. Standardna odklona strižne trdnosti in sile loma sta sicer majhna. Pri deležu loma po lesu lahko opazimo, da je pri vseh preizkušancih prišlo do loma znotraj lepilnega spoja (Slika 15), kar glede na nizke strižne trdnosti ni presenetljivo.

4.3.2 Testiranje za trajnostni razred C2

Preglednica 12: Preizkušanci zlepljeni s poliestrskim lepilom in pripravo za trajnostni razred C2

Preizkušanec	b	l ₂	A	t	F _{max}	τ	Lpl
	mm	mm	mm ²	s	N	N/mm ²	%
PE-2-1	20,1	10,4	209	4,52	203	0,971	0
PE-2-2	20,2	10,4	210	5,29	341	1,62	0
PE-2-3	20,2	10,4	210	4	60,00	0,29	0
PE-2-4	20,1	10,4	209	7,24	456	2,18	0
PE-2-5	20,1	10,3	208	6,06	367	1,77	0
PE-2-6	20,2	10,4	210	7,93	611	2,91	0
PE-2-7	20,1	10,3	207	7,32	8,22	0,04	0
PE-2-8	20,2	10,4	210	5,52	344	1,64	0
PE-2-9	20,2	10,5	211	7,4	479	2,28	0
PE-2-10	20,2	10,4	210	3,52	59,6	0,28	0
povp.						1,4	0
min.						0,04	0
max.						2,91	0
st. odklon						0,97	0

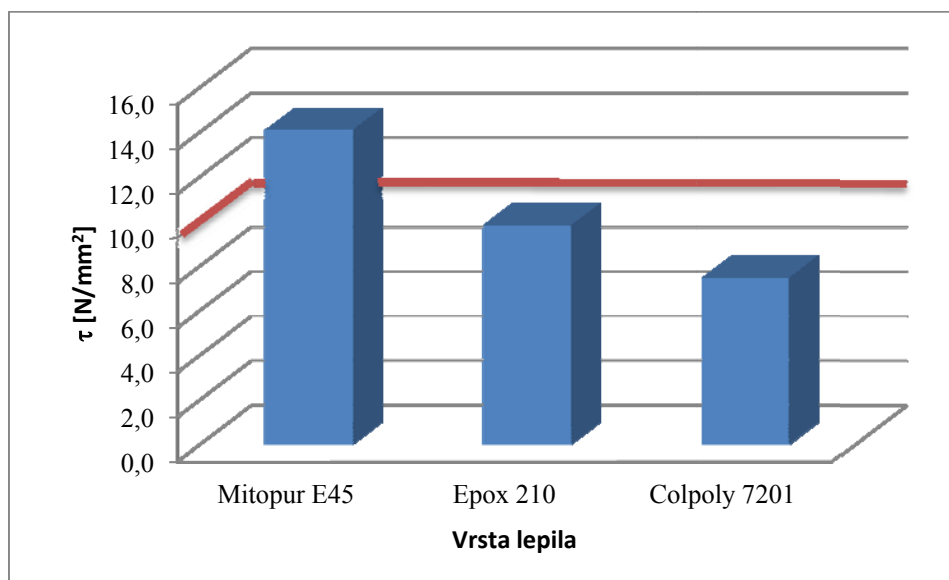
Pri testiranju za trajnostni razred C2 mora biti strižna trdnost $\geq 7 \text{ N/mm}^2$. Iz preglednice 12 je razvidno, da noben preizkušanec ne dosega minimalne strižne trdnosti, prav tako je povprečje daleč od zahteve standarda (na 20 %). Najboljši rezultat je predstavljal 64 % zahtevane trdnosti. Standardna odklona strižne trdnosti in sile loma sta relativno velika, kar je predvsem posledica zelo nizke trdnosti več preizkušancev ter slabega lepilnega spoja. Pri deležu loma po lesu lahko opazimo, da je pri vseh preizkušancih prišlo do loma znotraj lepilnega spoja (Slika 15), kar je glede na nizke strižne trdnosti pričakovano.

Pri testiranju za trajnostni razred C3 ter C4 je večina preizkušancev razpadla že med pripravo, tako, da lahko sklepamo, da je bila strižna trdnost poliestrskega lepilnega spoja v tem primeru praktično enaka nič.

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

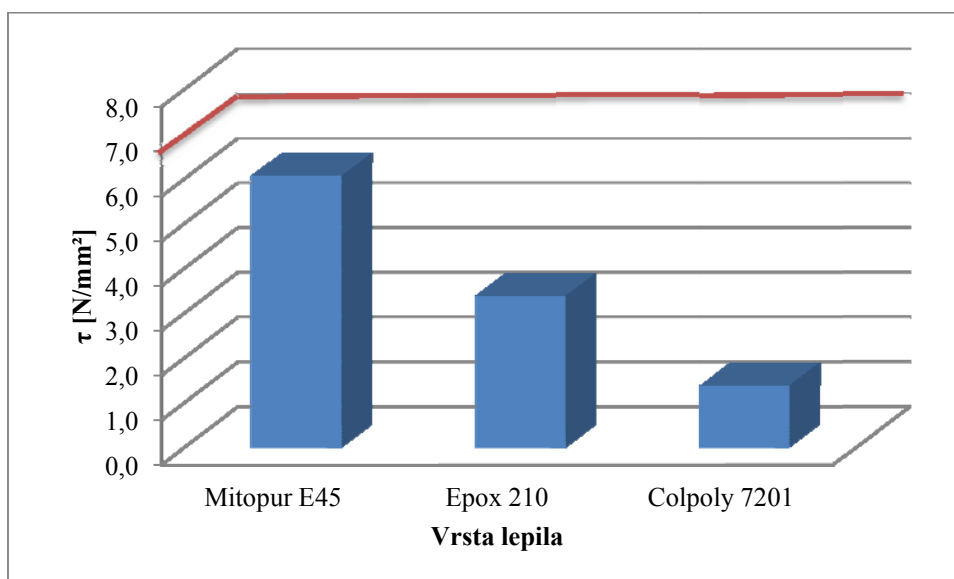
5.1.1 Primerjava lepil pri testiranju za trajnostni razred C1



Slika 16: Primerjava povprečnih strižnih trdnosti izbranih lepil pri trajnostnem razredu C1

Na grafu (Slika 16) lahko vidimo, da je edino lepilo, ki je doseglo standardizirano mejo trajnostnega razreda C1, Mitopur E45. Pri tem lepilu so bili vsi preizkušanci močno nad mejo, tako da je to lepilo povsem uporabno v notranjih prostorih, kjer je ravnovesna vlažnost lesa (u_r) < 15 %. Pri epoksidnem lepilu lahko opazimo, da je povprečje tik pod mejo (9,83 N/mm²). Trije preizkušanci so to mejo dosegli, trije so bili zelo pod mejo, med tem ko so bili štirje tik pod mejo (vsi nad 9,5 N/mm²). Sicer epoksidno lepilo pri naših pogojih lepljenja ni doseglo zaželenih rezultatov, vendar verjamemo, da bi to lahko izboljšali s preizkušanjem različnih postopkov in parametrov lepljenja. Povsem drugače pa je z poliestrskim lepilom, kjer pa se je le en preizkušaneec približal standardizirani meji, povprečje pa je le 7,5 N/mm². To lepilo se je izkazalo za povsem neuporabno v pogojih trajnostnega razreda C1.

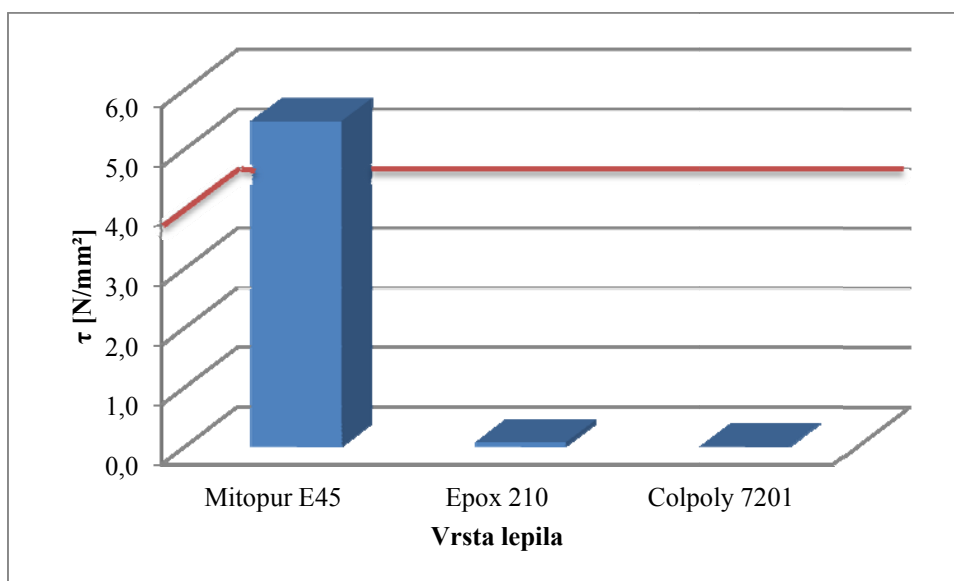
5.1.2 Primerjava lepil pri testiranju za trajnostni razred C2



Slika 17: Primerjava povprečnih strižnih trdnosti izbranih lepil pri trajnostnem razredu C2

Kot je razvidno iz grafa (Slika 17) ni nobeno lepilo doseglo minimalne standardizirane strižne trdnosti. Še najbližje temu je bilo lepilo Mitopur E45, ki se je približalo na 86 % minimalni standardizirani strižni trdnosti. Drugi dve lepili sta ostali močno pod to mejo (Epox 210 na 42 %; Colpoly 7201 pa na 20 %) in sta torej praktično neuporabni za zunanjo uporabo ali v prostorih, kjer je ravnovesna vlažnost lesa (u_r) < 15 % ter včasih pride do kratkotrajne omočitve z vodo ali pa do kratkotrajnega povišanje relativne zračne vlažnosti.

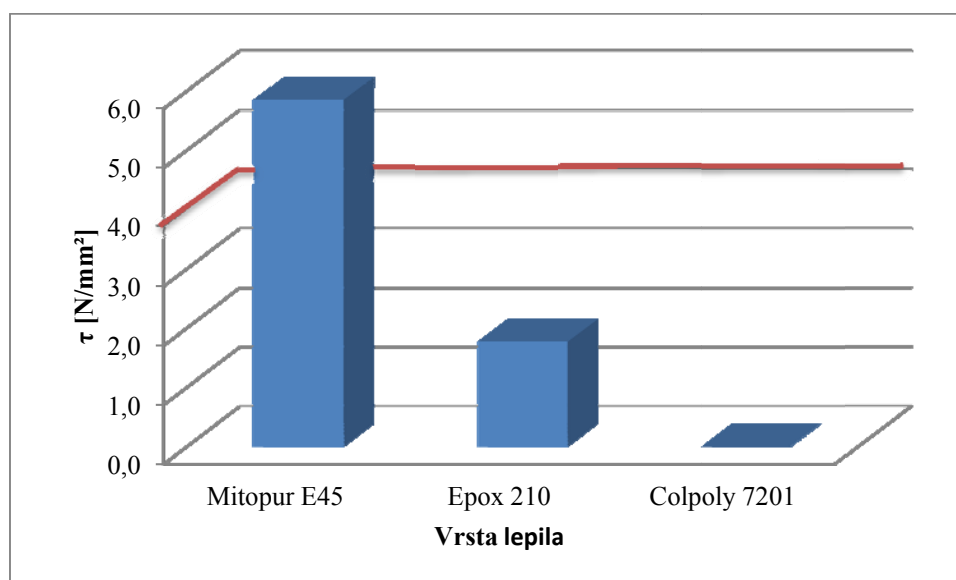
5.1.3 Primerjava lepil pri testiranju za trajnostni razred C3



Slika 18: Primerjava povprečnih strižnih trdnosti izbranih lepil pri trajnostnem razredu C3

Na grafu (Slika 18) lahko opazimo ogromno razliko med lepilom Mitopur E45 in pa ostalima dvema. Pri lepilih Epox 210 ter Colpoly 7201 je večino preizkušancev razpadlo že med samim postopkom priprave (Slika 11), nekateri so razpadli med vpenjanjem v trgalni stroj, le 2 preizkušanca epoksidnega lepila pa smo uspeli tudi testirati, vendar sta imela strižno trdnost pod 1 N/mm². Drugače pa je z lepilom Mitopur E45, ki pa je doseglo skoraj enako dobre rezultate kot pri testiranju za trajnostni razred C2, kar je vsekakor presenetljivo. Takšen rezultat pomeni tudi, da je lepilo povsem uporabno v notranjih prostorih, kjer je pogosto izpostavljeno tekoči vodi ali pa zunaj v pokritih prostorih.

5.1.4 Primerjava lepil pri testiranju za trajnostni razred C4



Slika 19: Primerjava povprečnih strižnih trdnosti izbranih lepil pri trajnostnem razredu C4

Na grafu (Slika 19) lahko opazimo bistveno odstopanje lepila Mitopur E45 od ostalih dveh lepil. Tudi tokrat dosega trdnosti primerljive s trdnostmi pri testiranju za trajnostna razreda C2 ter C3. Iz tega lahko sklepamo, da na poliuretansko lepilo voda vpliva praktično enako, ne glede na njeno temperaturo. Tako lahko ugotovimo, da bi bilo lepilo povsem uporabno v prostorih s pogostimi ter dolgotrajnejšimi izpostavitvami tekoči vodi, ali pa zunaj neposredno izpostavljeno vremenskim vplivom, seveda pod pogojem, da je lepljeni izdelek površinsko zaščiten.

Za razliko od testiranja za trajnostni razred C3 je tudi epoksidno lepilo tukaj doseglo kar dobre trdnosti, kar je sicer neobičajno glede na rezultate za C3, tako da bi za odkritje vzrokov morali najverjetneje opraviti še eno serijo meritev. Vsekakor pa je vzpodbudno predvsem, da so se 3 preizkušanci približali na preko 80 % minimalne standardizirane vrednosti. To pomeni, da se z lepilom Epox 210 lahko kakovostno zlepi, vendar le z veliko natančnostjo pri postopku lepljenja, pri čemer menimo, da bi v prvi vrsti morali odpraviti težave z preveliko penetracijo, kar je bilo prisotno v našem primeru. Pri poliestrskem lepilu Colpoly 7201 ni bilo nobenega veljavnega rezultata, tako da lahko zaključimo, da je to lepilo neuporabno v pogojih trajnostnega razreda C4.

5.2 SKLEPI

Na osnovi raziskave lahko oblikujemo naslednje sklepe:

- Najprimernejše lepilo za izdelavo slojnatega cevnega kompozita je poliuretansko lepilo Mitopur E45, saj je med izbranimi lepili doseglo najvišje strižne trdnosti.
- Epoksidna smola Epox 210 ni uporabna za izdelavo slojnatega cevnega kompozita, saj trdnosti lepilni spojev pri strižni obremenitvi niso bile dovolj visoke.
- Poliestrska smola Colpoly 7201 je povsem neuporabna za izdelavo slojnatega cevnega kompozita, saj se trdnost lepilnih spojev ni niti približala minimalnim zahtevam, večina preizkušancev pa je razpadla že med pripravo.
- Epoksidna smola se je v nekaterih primerih pokazala kot zelo dobra, predvsem z rešitvijo težave prehitre penetracije in primerno količino nanosa pa bi lahko tudi postala primerna, saj so nekateri preizkušanci dosegli visoke trdnosti.

6 VIRI

1. Čufar K. 2006. Anatomija lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 185 str.
2. Epox 210 2 komponentno vezivo. Samson Kamnik
[file:///C:/Users/andrej/Downloads/EPOX%20210%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/andrej/Downloads/EPOX%20210%20(2).pdf)
3. Mitopur E45 1 komponentno poliuretansko lepilo. 2010. Mitol (1.12.2010)
<http://www.mitol.si/pdf/MITOPUR%20E45%2001.12.2010.pdf>
4. Resnik J. 1989. Lepila in lepljen les. Učbenik, Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
5. Šernek M. 2007. Študijsko gradivo za predavanja pri predmetu Furnir in lepljen les: visokošolski strokovni študij / Milan Šernek. Učno gradivo, Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
6. SIST EN 12765 2002. Razvrstitev duromernih lepil za les za nekonstrukcijsko uporabo.
7. SIST EN 205 2003. Lepila - Lepila za les za nekonstrukcijsko uporabo - Ugotavljanje natezno strižne trdnosti spojev s preklopom.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Milanu Šerneku za pomoč pri izvedbi in usmerjanju diplomskega dela.

Hvala tudi recenzentu viš. pred. mag. Bogdanu Šegi za strokovno recenzijo diplomskega dela, ter vso pomoč pri izvajanju preizkusov.

Posebna zahvala gre tudi staršema, ki sta mi omogočila študij in mi ves čas stala ob strani.

Hvala tudi Oddelku za Lesarstvo ter KD Rog, ki so mi omogočili hkratno delovanje na študijskem in športnem področju.