

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Jure KOREN

**LASTNOSTI TERMIČNO MODIFICIRANEGA
LAMELIRANEGA LESA ZA STAVBNO POHIŠTVO**

DIPLOMSKI PROJEKT

Visokošolski strokovni študij – 1. stopnja

Ljubljana, 2016

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Jure KOREN

**LASTNOSTI TERMIČNO MODIFICIRANEGA LAMELIRANEGA
LESA ZA STAVBNO POHIŠTVO**

DIPLOMSKI PROJEKT
Visokošolski strokovni študij – 1. stopnja

**PROPERTIES OF THERMALLY TREATED LAMINATED WOOD
FOR DOORS AND WINDOWS**

B. SC. THESIS
Professional Study Programmes

Ljubljana, 2016

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.

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

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Podpisani izjavljam, da je naloga rezultat lastnega dela. Izjavljam, da je elektronski izvod identičen tiskanemu. Na univerzo neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravici shranitve avtorskega dela v elektronski obliki in reproduciranja ter pravico omogočanja javnega dostopa do avtorskega dela na svetovnem spletu prek Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete.

Jure Koren

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dv1
DK	UDK 630*824.87
KG	lameliran termično modificiran les/upogibna trdnost/strižna trdnost
AV	KOREN, Jure
SA	ŠERNEK, Milan (mentor)/ KARIŽ, Mirko (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. CIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2016
IN	LASTNOSTI TERMIČNO MODIFICIRANEGA LAMELIRANEGA LESA ZA STAVBNO POHIŠTVO
TD	Diplomski projekt (Visokošolski strokovni študij – 1. stopnja)
OP	X. 46 str., 50 sl., 2 pril., 17 vir.
IJ	sl
JJ	sl/en
AI	Okna kot del stavbnega pohištva, ki je prisotno na vsakem objektu, so lahko lesena, PVC ali aluminijasta. Lesena okna dajejo zgradbam pridih narave, niso pa tako trajna in odporna. Zaradi tega so se na trgu pojavila okna iz termično modificirane smrekovine, ki zagotavljajo večjo odpornost za nižjo ceno od oken, izdelanih iz macesna ali hrasta. Termična modifikacija smrekovine poteka v inertni atmosferi pri temperaturah do 240 °C. Na ta način les postane odpornejši, zniža se mu ravnovesna vlažnost, poslabšajo pa se določene druge lastnosti, npr. poveča se krhkost, zmanjša upogibna trdnost, lepljenje in površinska obdelava sta otežena. V diplomskem delu smo preverjali upogibno trdnost lepljenega lameliranega lesa, ki se uporablja za izdelavo oken, ter strižno trdnost lepilnih spojev. Lepljenje smo zlepili s tremi različnimi lepili (Rakoll GXL 4 Plus, Mekol D3 in Purbond HB 440) v štiri različne sestave: prvi lepljenec je bil iz treh nemodificiranih smrekovih lamel, drugi iz treh modificiranih, tretji je imel zunanji dve modificirani in srednjo nemodificirano, četrti pa eno zunanjo lamelo modificirano ostali dve pa ne. Največja upogibna in strižna trdnost je bila dosežena pri nemodificiranih lepljencih, zlepljenih z lepilom Purbond. Tudi ostali dve lepili sta dosegli dobre rezultate, vendar je bila trdnost nekoliko nižja. Na podlagi meritev priporočamo lepljenje termično modificiranih elementov z enim od PVAc lepil, saj je njuna cena nižja in kakovost zlepljenosti zadovoljiva.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND Dv1
DC UDC 630*824.87
CX laminated thermally treated wood/bending strength/shear strength
AU KOREN, Jure
AA ŠERNEK, Milan (supervisor)/KARIŽ, Mirko (reviewer)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina c. CIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY 2016
TY PROPERTIES OF THERMALLY TREATED LAMINATED WOOD FOR DOORS AND WINDOWS
DT B. Sc. Thesis (Professional Study Programmes)
NO X, 46 p., 50 fig., 2 ann., 17 ref.
LA sl
Al sl/en
AB Windows, as part of each building, can be wooden, PVC or made of aluminium. Wooden windows look more natural, but they are not durable and resistant enough. Therefore, new windows, made of thermally treated spruce, have appeared in the market. They assure better resistance, compared to the windows made of larch or oak, for lower price. Thermal treatment of spruce is made in an inert atmosphere at the temperatures up to 240 °C. The treated wood becomes more durable, the equilibrium moisture decreases, but some properties deteriorate, for example, the fragility increases, the bending strength decreases, bonding and surface finish are more difficult. In the graduation thesis we measured the bending strength of 3-ply laminated wood for windows as well as the joints shear strength. We used three different adhesives (Rakoll GXL 4 Plus, Mekol D3 and Purbond HB 440) to bond the lamellas in four different laminates: The first laminate part was made of three thermally not treated spruce lamellas, the second one of three thermally treated lamellas, the third of two external thermally treated and the internal not thermally treated lamella and the fourth with the one external thermally treated lamella and the two lamellas not treated. The highest bending strength had the laminated wood from non treated wood, bonded with Purbond adhesive. Two other adhesives also showed good results, but with a smaller strength. Based on the results, we suggest bonding of thermally modified wood by one of PVAc adhesives as their price is lower and the quality of bonding is still good enough.

KAZALO VSEBINE

	Str.
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO SLIK	VIII
KAZALO PRILOG	X
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2 CILJI DIPLOMSKEGA DELA	2
1.3 DELOVNE HIPOTEZE	2
2 PREGLED OBJAV	3
2.1 MODIFIKACIJA LESA	3
2.2 TERMIČNA MODIFIKACIJA LESA	3
2.3 POSTOPKI TERMIČNE MODIFIKACIJE LESA	4
2.3.1 Plato postopek	5
2.3.2 ThermoWood postopek	5
2.3.3 Retification postopek	5
2.3.4 Boisperdure postopek	6
2.3.5 Oil heat treatment postopek	6
2.4 LEPLJENJE TERMIČNO MODIFICIRANEGA LESA	6
2.5 STAVBNO POHIŠTVO IZ TERMIČNO MODIFICIRANEGA LESA	7
2.6 KONSTRUKCIJSKA RABA TERMIČNO MODIFICIRANEGA LESA	8
3 MATERIALI IN METODE	9
3.1 MATERIALI	9
3.1.1 Lepila	9
3.1.1.1 Rakoll GXL 4 Plus	9
3.1.1.2 Mekol D3	9
3.1.1.3 Purbond HB 440	10
3.1.2 Les	10

3.1.2.1	Smrekovina	10
3.2	PRIPRAVA LEPLJENCEV	10
3.2.1	Priprava lamel	10
3.2.2	Termična modifikacija lamel	11
3.2.3	Skobljanje lamel	11
3.2.4	Izdelava lepljencev	12
3.2.5	Obdelava lepljencev	14
3.3	PRIPRAVA PRIZKUŠANCEV ZA UPOGIBNI IN STRIŽNI TEST	14
3.4	METODE DELA	16
3.4.1	Merjenje preizkušancev za upogibni test	16
3.4.2	Ugotavljanje upogibne trdnosti	16
3.4.3	Merjenje preizkušancev za strižni preizkus	19
3.4.4	Ugotavljanje strižne trdnosti lepilnih spojev	19
4	REZULTATI	22
4.1	UPOGIBNA TRDNOST	22
4.1.1	Lepljenci sestave SM – SM – SM	22
4.1.2	Lepljenci sestave TMS – TMS – TMS	22
4.1.3	Lepljenci sestave TMS – SM – TMS	23
4.1.4	Lepljenci sestave TMS – SM – SM	24
4.2	MODUL ELASTIČNOSTI	24
4.2.1	Lepljenci sestave SM – SM – SM	24
4.2.2	Lepljenci sestave TMS – TMS – TMS	25
4.2.3	Lepljenci sestave TMS – SM – TMS	26
4.2.4	Lepljenci sestave TMS – SM – SM	26
4.3	STRIŽNA TRDNOST	27
4.3.1	Lepljenci SM – SM – SM	27
4.3.2	Lepljenci TMS – TMS – TMS	28
4.3.3	Lepljenci TMS – SM – TMS	29
4.3.4	Lepljenci sestave TMS – SM – SM	31
5	RAZPRAVA IN SKLEPI	33
5.1	RAZPRAVA	33

5.1.1	Upogibna trdnost	33
5.1.2	Modul elastičnosti	37
5.1.3	Strižna trdnost	38
5.1.4	Skupna ocena	40
5.2	SKLEPI	42
6	POVZETEK	43
7	VIRI	45
	ZAHVALA	
	PRILOGE	

KAZALO SLIK

Slika 1: Primer smoljenja iz smrekovega okenskega profila.	4
Slika 2: Fasada in okna iz termično modificiranega lesa na prizidku Oddelka za lesarstvo (Oddelek za lesarstvo, 2015).	7
Slika 3: Žaganje na stroju za vzdolžno žaganje lesa.	10
Slika 4: Komora za termično modifikacijo lesa v podjetju Silvaproduct.	11
Slika 5: Primer spremembe dimenzij in barve lesa pri termični modifikaciji po postopku Silvapro Wood.	11
Slika 6: Štiristranski skobeljni stroj Weinig Profimat 23E.	12
Slika 7: Lepila Purbond HB 440, Mekol D3 in Rakoll GXL 4 Plus.	13
Slika 8: Valjčno nanašanje lepila z ročnim nanašalnikom Pfohl.	13
Slika 9: Stiskanje v stiskalnici za ploskovno lepljenje Orma.	14
Slika 10: Skobljanje lepljencev na kombiniranem poravnalno-debelinskem skobeljnem stroju SCM Linvincibile 2000d.	14
Slika 11: Primer izdelave in označevanja strižnih preizkušancev (zgoraj od desne proti levi 1. in 2. preizkušanec, spodaj od desne proti levi pa 3. in 4. preizkušanec).	15
Slika 12: Žaganje na čelilnem stroju OMGA.	15
Slika 13: Merjenje širine z digitalnim kljunastim merilom.	16
Slika 14: Shema štiritočkovnega upogibnega preizkusa (standard SIST EN 408: 2010).	17
Slika 15: Primer vstavitve železne ploščice pod pritiski valj.	17
Slika 16: Štiritočkovni preizkus upogibne trdnosti na napravi Zwick Roell Z100.	18
Slika 17: Merilnik Heidenhain MT 12 za merjenje povesa, postavljen na sredino preizkušanca.	18
Slika 18: Merjenje višine preizkušanca za strižni test z digitalnim kljunastim merilom.	19
Slika 19: Shema strižnega preizkusa po standardu SIST EN 14080: 2012 (standard SIST EN 14080: 2012).	20
Slika 20: Strižni preizkus na napravi Zwick Roell Z100.	20
Slika 21: Primer postavitve preizkušanca (pogled z vrha, s smeri pritisnega valja).	21
Slika 22: Upogibna trdnost kontrolnih lameliranih preizkušancev (SM – SM – SM), lepljenih z različnimi lepili.	22
Slika 23: Upogibna trdnost lameliranih preizkušancev (TMS – TMS – TMS), lepljenih z različnimi lepili.	23
Slika 24: Upogibna trdnost lameliranih preizkušancev (TMS – SM – TMS), lepljenih z različnimi lepili.	23
Slika 25: Upogibna trdnost lameliranih preizkušancev (TMS – SM – SM), lepljenih z različnimi lepili.	24
Slika 26: Modul elastičnosti lameliranih preizkušancev (SM – SM – SM), lepljenih z različnimi lepili.	25
Slika 27: Modul elastičnosti lameliranih preizkušancev (TMS – TMS – TMS), lepljenih z različnimi lepili.	25

Slika 28: Modul elastičnosti lameliranih preizkušancev (TMS – SM – TMS), lepljenih z različnimi lepili.	26
Slika 29: Modul elastičnosti lameliranih preizkušancev (TMS – SM – SM), lepljenih z različnimi lepili.	27
Slika 30: Strižna trdnost spojev v lameliranih preizkušancih (SM – SM – SM), lepljenih z različnimi lepili.	28
Slika 31: Delež loma po lesu pri preizkušancih (SM – SM – SM), lepljenih z različnimi lepili.	28
Slika 32: Strižna trdnost spojev v lameliranih preizkušancih (TMS – SM – TMS), lepljenih z različnimi lepili.	29
Slika 33: Delež loma po lesu pri preizkušancih (TMS – TMS – TMS), lepljenih z različnimi lepili.	29
Slika 34: Strižna trdnost spojev v lameliranih preizkušancih (TMS – SM – TMS), lepljenih z različnimi lepili.	30
Slika 35: Deleži loma po lesu pri preizkušancih (TMS – SM – TMS), lepljenih z različnimi lepili.	30
Slika 36: Strižna trdnost spojev v lameliranih preizkušancih (TMS – SM – SM), lepljenih z različnimi lepili.	31
Slika 37: Delež loma po lesu pri preizkušancih (TMS – SM – SM), lepljenih z različnimi lepili.	32
Slika 38: Povprečja upogibnih trdnosti.	33
Slika 39: Močno ukrivljen lepljenec, vendar loma še ni.	34
Slika 40: Primer delaminacije.	34
Slika 41: Poškodbe pri lepljencu iz termično modificiranih lamel.	35
Slika 42: Delna delaminacija in prelom po lesu.	35
Slika 43: Prelom po braniki (ugoden potek vlaken).	36
Slika 44: Velike poškodbe na modificirani lameli.	36
Slika 45: Povprečja modula elastičnosti.	37
Slika 46: Povprečja strižnih trdnosti.	38
Slika 47: Obarvan lom po lepilu.	39
Slika 48: Popoln lom po lepilnem spoju – delež loma po lesu je 0 %.	39
Slika 49: Lom po spoju preizkušanca, zlepljenega z lepilom Purbond.	40
Slika 50: Popoln lom po lesu – delež loma po lesu je 100 %.	41

KAZALO PRILOG

Priloga A

Meritve upogibne trdnosti in modula elastičnosti

Priloga B

Strižna trdnost lepilnih spojev

1 UVOD

Les je naraven material, ki ga človek uporablja že od pradavnine. Že pred več tisoč leti je les pomenil eno glavnih surovin za kurjenje in gradnjo. Danes ga lahko nadomestimo z različnimi materiali: pri gradnji sta to predvsem beton in železo, pri ostalih izdelkih pa les največkrat nadomestijo polimeri. Glavni vzrok za to sta predvsem večji trajnost in odpornost ostalih materialov proti raznim biotskim in abiotskim dejavnikom. Velikokrat lahko opazimo balkonske ograje in okna, ki so od daleč videti kot lesena, ko pa se približamo, ugotovimo, da gre za PVC material. Sodobne tehnologije omogočajo, da se z različnimi tehnikami tiska umetni materiali precej dobro približajo naravnim – tako je tudi pri imitaciji lesa.

Proizvajalcem lesenih oken predvsem v zadnjem desetletju predstavljajo veliko konkurenco proizvajalci PVC stavbnega pohištva. Stranke največjo prednost PVC stavbnega pohištva vidijo v trajnosti in odpornosti proti vremenskim vplivom; prepriča pa jih tudi to, da oken ni potrebno ponovno premazovati, ter precej nižja cena v primerjavi z lesenimi okni.

Odpornost lesenih oken (običajno izdelanih iz smrekovine) so lesarji začeli izboljševati z uporabo odpornejših lesnih vrst. Na tržišču sta se pojavila sibirski macesen (*Larix sibirica*) in hrast (*Quercus*), ki sta sicer precej bolj odporna od smreke, vendar imata tudi precej višjo ceno. Tako so postala lesena okna še dražja in manj zanimiva za kupca.

V zadnjem času je ekološka ozaveščenost precej večja in vse več ljudi se odloča za lesena okna, še vedno pa se stremi k nižji ceni in boljši odpornosti. Tako se je razvil postopek termične modifikacije lesa, s katerim manj odpornim lesnim vrstam povečamo odpornost. Z modifikacijo smreke se je pojavila priložnost tudi za proizvajalce oken. Okno iz smrekovega lesa namreč predstavlja osnovo za določanje cene pri lesenih oknih. Termična modifikacija ima seveda tudi svojo ceno, vendar je cena kubičnega metra modificirane smrekovine še vedno nižja od cene kubičnega metra macesna. Modificiran les sicer postane temnejši in spremeni se mu nekaj mehanskih lastnosti, vendar je še vedno primeren za izdelavo okenskih profilov in ostalih izdelkov. Prav tako je obremenitev okolja zaradi predelave lesa in modifikacije manjša kot pri kovinah in PVC materialih.

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Ko les modificiramo pri povišani temperaturi, se mu spremenijo nekatere ključne lastnosti, ki posledično vplivajo na končne izdelke, narejene iz takšnega lesa. Nekateri lastnosti se poslabšajo, druge pa izboljšajo. Termično modificiran les ima boljšo dimenzijsko stabilnost, boljšo odpornost, nižjo ravnovesno vlažnost in nižjo toplotno prevodnost,

zmanjšano je smoljenje lesa. Bolj smolnati lesovi se lahko zelo temno obarvajo, nižje pa so mehanske lastnosti (Humar, 2015).

Pri postopku termične modifikacije se spremenijo tudi površinske lastnosti lesa, kar lahko povzroča težave pri lepljenju in vpliva na kakovost lepilnega spoja.

1.2 CILJI DIPLOMSKEGA DELA

V nalogi smo želeli ugotoviti strižno trdnost lepilnega spoja pri različnih kombinacijah lepljencev iz modificiranega in nemodificiranega smrekovega lesa, zlepljenih s tremi različnimi lepili, ter ugotoviti vpliv termične modifikacije na upogibne lastnosti lepljenega lameliranega lesa. Na podlagi rezultatov, dobljenih pri testiranjih, smo ocenili, ali je lepljen lameliran les primeren za konstrukcijske namene in, ali je primeren za okna, kjer je tudi potrebna določena nosilnost.

Okna so sestavljena z mozničeno ali čepno vezjo. Predvsem pri čepni vezi pride do strižnih sil, ki nastanejo zaradi stekla, vgrajenega v okensko krilo. S preizkusom strižne trdnosti smo določili vrednost, do katere lahko te vezi v končnem izdelku obremenimo.

1.3 DELOVNE HIPOTEZE

Predvidevali smo, da bo lepljenje termično modificirane smrekovine zahtevnejše od lepljenja nemodificirane smrekovine ter da bodo trdnosti spojev med modificiranimi lamelami, med nemodificiranimi in modificiranimi ter samimi nemodificiranimi lamelami različne. Predpostavljali smo tudi, da bo tip lepila vplival na trdnost lepilnega spoja. Manjšo upogibno trdnost smo pričakovali pri lepljencih z eno ali več modificiranimi lamelami, najvišje trdnosti (strižne in upogibne) pa pri lepljencih iz nemodificiranih lamel.

2 PREGLED OBJAV

2.1 MODIFIKACIJA LESA

Les lahko modificiramo na več načinov:

- Pri kemični modifikaciji prihaja do kemičnih reakcij med funkcionalnimi skupinami lesa in vneseno kemikalijo.
- Pri površinski modifikaciji z uporabo kemičnih, fizikalnih in bioloških agentov površini lesa spremenimo ključne lastnosti.
- Pri modifikaciji z impregnacijo les zapolnimo z inertnim materialom, pri tem pa ne prihaja do kemijskih interakcij med agentom in lesom.

Pri termični modifikaciji gre za segrevanje lesa pri povišani temperaturi v posebnih komorah brez uporabe dodatnih kemikalij (Humar, 2015).

2.2 TERMIČNA MODIFIKACIJA LESA

Namen termične modifikacije lesa je izboljšanje dimenzijske stabilnosti in odpornosti proti glivam in insektom. Tako lahko tudi manj odporne vrste lesa uporabimo tam, kjer bi sicer morali uporabiti odpornejšo lesno vrsto, ki pa je navadno dražja. Ker se pri tem ne poslužujemo nobenih dodatnih kemikalij, je tak material ekološko sprejemljivejši. Termično modificiran les se največ uporablja za okna, vrata, zunanje stenske obloge, talne obloge, vrtno pohištvo, pa tudi notranje obloge savn. Ker s termično modifikacijo dosežemo boljšo dimenzijsko stabilnost, les lahko uporabljamo tudi v vlažnih pogojih (Kariž in Šernek, 2008; Šernek, 2011).

Modifikacija pri temperaturah okrog 200 °C povzroči trajne spremembe v kemijski zgradbi olesenele celične stene, ki jo sestavljajo polimeri, kot so celuloza, hemiceluloze in lignin. Ker te polimere delno zamrežimo, se molekule vode težje vežejo v les; manj je OH skupin, na katere se veže voda. To pa pomeni manjšo stopnjo navlaženosti in večjo dimenzijsko stabilnost. Zaradi kemijskih sprememb se spremeni tudi barva lesa, poveča se odpornost proti škodljivcem, akustične lastnosti so boljše, manjša je toplotna prevodnost, ravnovesna vlažnost se zmanjša itd. Poleg teh sprememb se zmanjšajo tudi težave z iztekanjem smole (Slika 1), ki lahko končni izdelek estetsko zelo poslabšajo (Kariž in Šernek, 2008; Rep in Pohleven, 2010).



Slika 1: Primer smoljenja iz smrekovega okenskega profila.

Neizkušeni uporabniki lahko zaradi sprememb, doseženih s segrevanjem v inertni atmosferi, modificiran les obravnavajo kot nov material, čeprav to ni.

Pri termični modifikaciji pride do poslabšanja mehanskih lastnosti, saj se zmanjšata predvsem upogibna trdnost in udarna žilavost. Les se hitreje razcepi, mehanska obdelava je nekoliko zahtevnejša, možno je tudi izpadanje grč. Prav tako ne moremo modificirati večjih presekov in zelo smolnati lesovi se temneje obarvajo. Vendar pa je te spremembe možno nadzorovati z uravnavanjem stopnje modifikacije (sprememba temperature in trajanja procesa). Lesovi, ki so modificirani pri ostrejših pogojih, niso primerni za konstrukcijsko rabo, kjer so prisotne velike obtežitve (Rep in Pohleven, 2010).

2.3 POSTOPKI TERMIČNE MODIFIKACIJE LESA

Razvitih je več vrst postopkov termične modifikacije lesa. Ti se med seboj najbolj razlikujejo v številu korakov, deležu kisika ali drugih plinov v atmosferi med postopkom modifikacije, temperaturi, trajanju postopka ter v začetni vlažnosti lesa. Stopnja modifikacije se podaja z odstotkom izgube mase, to pa lahko uravnavamo s časom trajanja postopka in s temperaturo (razpon med 160 in 260 °C). Postopki termične modifikacije, ki se v Evropi najpogosteje v uporabljajo, so (Kariž in Šernek, 2008):

- Plato postopek (PLATO BV, Nizozemska),
- ThermoWood postopek (Stora, Finnforest, Finska),
- Retification postopek (NOW: New Option Wood, Francija),
- Boisperdure (BCI-MBS, Francija),
- Oil-heattreatment postopek (Menz Holz, Nemčija).

2.3.1 Plato postopek

Postopek modifikacije lesa Plato je bil razvit v 80-ih letih prejšnjega stoletja na Nizozemskem in je sestavljen iz petih faz:

1. Predsušenje: če je les prevlažen za hidrotermično obdelavo, se predsušenje izvaja v klasičnih sušilnicah.
2. Hidrotermična obdelava: les se pri povišanem tlaku in vodni pari segreje na 150–180 °C. Hemiceluloze in lignin razpadejo v vmesne reaktivne produkte (polioze v aldehide in kisline, celuloza pa ostane nespremenjena).
3. Sušenje: les se 3–5 dni (odvisno od dimenzij sortimentov) suši na 10 % vlažnost v klasični sušilnici.
4. Utrjevanje: Les se v suhih razmerah in pri atmosferskem tlaku ponovno segreje na 150–190 °C. Trajanje je odvisno od vrste in debeline lesa in znaša od 14 do 16 ur. Aldehidi, ki so nastali pri hidrotermični obdelavi, reagirajo z aktiviranimi molekulami lignina in tvorijo nopolarne vezi, povezane s strukturo lesa.
5. Kondicioniranje: les se kondicionira na vlažnost, ki je primerna za končno uporabo (Kariž in Šernek, 2008; Sandberg in Kutnar, 2015).

2.3.2 ThermoWood postopek

Ta postopek je bil razvit leta 1993 na Finskem in je vodilni na tržišču v Evropi in svetu. Danes se v Evropi proizvede okoli 300 000 m³ termično modificiranega lesa po postopku ThermoWood. Primeren je tako za modifikacijo lesa iglavcev kot tudi listavcev, potrebno je le nekoliko spremeniti pogoje modifikacije za posamezno vrsto. Uporabimo lahko posušen ali pa svež les, ki ga najprej posušimo pri visoki temperaturi. Postopek ThermoWood je sestavljen iz treh faz:

1. Segrevanje: les se hitro segreje s toploto in paro na 100 °C, nato se temperatura počasi poviša na 130 °C. Tako se les posuši skoraj na 0 % vlažnosti.
2. Modificiranje: v tej fazi se temperatura poviša na 185–215 °C in vzdržuje 2 do 3 ure, odvisno, kakšno stopnjo modifikacije želimo doseči.
3. Hlajenje in kondicioniranje: les se ohladi in kondicionira z razprševanjem vode, pri tem pa skušamo preprečiti nastanek razpok. Ko je les ohlajen na 80–90 °C, sledi navlaževanje na 4–7 % vlažnost (Kariž in Šernek, 2008; Sandberg in Kutnar, 2015).

2.3.3 Retification postopek

Retification postopek (NOW: New Option Wood) je bil razvit v Franciji in industrializiran leta 1997 pod blagovno znamko Retiwood. Les najprej intenzivno posušimo pri temperaturah 160–180 °C. Po sušenju temperaturo povišamo na 200–240 °C, kar ustreza

temperaturi steklastega prehoda za določeno lesno vrsto. Z uporabo dušikove atmosfere zagotovimo, da je med modifikacijo v atmosferi manj kot 2 % kisika. Po modifikaciji se les hladi z razprševanjem vode. Kakovost modifikacije se določa s temperaturo, časom izpostavljenosti tej temperaturi in trajanjem celotnega postopka termične modifikacije (Kariž in Šernek, 2008; Parvis in Sandberg, 2011).

2.3.4 Boisperdure postopek

To je še eden izmed postopkov, razvitih v Franciji. Postopek je sestavljen iz treh faz:

1. Odstranitev proste vode: pri tem postopku imamo na začetku svež les in tako najprej odstranimo prosto vodo.
2. Odstranitev vezane vode.
3. Termična modifikacija: les se izpostavi temperaturi med 200 in 300 °C in vodni pari, ki jo dobimo pri postopku sušenja lesa. S tem postopkom naj bi alkoholi, katrami in smole prešli iz lumnov celic v celične stene. Te predstavljajo zaščitni sloj, ki zaustavi ali upočasni napredovanje gliv.

Les, ki ga obdelamo s tem postopkom, ima podobne lastnosti kot les, obdelan po postopku Retification (Kariž in Šernek, 2008; Parvis in Sandberg, 2011).

2.3.5 Oil heat treatment postopek

Postopek Oil heat treatment je začelo uporabljati nemško podjetje Menz Holz leta 2000. Pri tem postopku les potopimo v olje ter s tem preprečimo dostop kisika v les. Preko olja se toplota prenese v les, kar je bolj učinkovito kot pa segrevanje v plinski atmosferi. Oljna kopel ima približno 220 °C, take pogoje pa vzdržujemo 2–4 ure. Olja, ki se v tem postopku uporabljajo, so lahko laneno, sončnično ali olje oljne repice. Po koncu modifikacije olje vakuumsko odstranimo iz lesa (Kariž in Šernek, 2008; Parvis in Sandberg, 2011).

2.4 LEPLJENJE TERMIČNO MODIFICIRANEGA LESA

Termično modificiranega lesa za stenske in talne obloge ni treba lepiti, saj se navadno uporabljajo tanjše lamele, ki jih običajno med seboj vijačimo. Za nekoliko zahtevnejše izdelke pa je potrebno lamele lepiti skupaj, da dosežemo večje dimenzije in večjo nosilnost. Taki so na primer elementi za okna in vrata, pa tudi notranje in vrtno pohištvo (Kariž in Šernek, 2008).

Lepljenje termično modificiranega lesa je lahko težavno. Mogoče je, da se na površini pojavi povečan delež ekstraktivnih snovi in ostalih produktov modifikacije, delno pa se spremeni tudi kemijska sestava lesa. Ravnovesna vlažnost modificiranega smrekovega lesa

se v standardni klimi zniža in znaša od 4 do 5 %, medtem ko je ravnovesna vlažnost nemodificiranega lesa okoli 12 %. Zmanjša se delež reaktivnih skupin v lesu in tudi pH vrednost pade, kar pomeni, da les postane kisel. Padec pH vrednosti lahko povzroči tudi korozijo na vijakih, ki jih uporabljamo za stenske obloge, zato je priporočljiva uporaba vijakov iz nerjavečega jekla. Večina lepil v kislem okolju slabše utrjuje, kar pa je za preostala lepila, kot so na primer urea-formaldehidna in melamin-formaldehidna lepila, prednost (Kariž in Šernek, 2008; Šernek in sod., 2008).

Raziskave so pokazale, da se termično modificiran les kvalitetno lepi z večino lepil, kot so polivinil-acetatna (PVAc), poliuretanska (PUR), izocionatna (PMDI in resorcinol-formaldehidna (RF). Potrebno je le nekoliko prilagoditi postopek lepljenja ali pa modificirati lepilo. Pri PVAc lepilih je treba zmanjšati delež vode ali pa podaljšati čas stiskanja, saj je higroskopsnost modificiranega lesa manjša in les težje sprejema vodo iz lepilnega spoja. Ugotovljeno je bilo tudi, da je kvalitetno lepljenje takšnega lesa ravno tako mogoče s hidrofobnimi lepili, kot so urea-formaldehidna (UF) in melamin-urea-formaldehidna (MUF) lepila. Termično modificiran les je namreč bolj hidrofoben, kar omogoča boljšo omočitev površine lesa (Šernek, 2011; Kariž in Šernek, 2008).

2.5 STAVBNO POHIŠTVO IZ TERMIČNO MODIFICIRANEGA LESA

Leseno stavbno pohištvo je bilo nekdanj najpogostejše uporabljeno pri gradnji objektov. V zadnjem desetletju ga pogosto nadomeščajo okna in vrata iz PVC in ALU materialov, ki pa pogosto niso najprimernejša za okolje. Vse večja ekološka ozaveščenost vpliva na večje zanimanje kupcev za leseno stavbno pohištvo. Les je naravni in estetski material, ki pa ima tudi določene slabosti, kar marsikoga odvrne od nakupa. Zato se vse večji poudarek daje na zaščito lesa, da bi lahko les vzdržal ostrejšje pogoje, ki so prisotni pri uporabi oken, vrat pa tudi stenskih oblog.



Slika 2: Fasada in okna iz termično modificiranega lesa na prizidku Oddelka za lesarstvo (Oddelek za lesarstvo, 2015).

Termična modifikacija je oblika zaščite lesa brez uporabe kemičnih zaščitnih pripravkov. Les se med modifikacijo temneje obarva in pridobi eksotičen videz. Smrekovina, obdelana po tem postopku, se lahko po novih lastnostih (predvsem glede odpornosti) približa naravno odpornejšim lesnim vrstam, kot sta macesen ali hrast. Po termični modifikaciji se smreka povzpne iz 4. razreda odpornosti v 2. razred. Prav to je glavni razlog za uporabo termično modificiranega smrekovega lesa v stavbnem pohištvu (M Sora, informativno gradivo, 2013).

Okna iz termično modificiranega lesa lahko vgradimo tudi brez površinske zaščite. V tem primeru se les po določenem času obarva sivo (enako kot pri fasadah iz macesna). Okna iz takšnega lesa so dimenzijsko stabilnejša in odpornejša ter vpijajo manj vode in vlage, kot na primer klasično smrekovo okno.

Termično modificiran les ima nižjo toplotno prevodnost (λ), zato je tudi toplotna izolativnost približno 20 % boljša. Ta lastnost je bistvenega pomena pri doseganju zahtev za pasivno vgradnjo oken (M Sora, informativno gradivo, 2013).

2.6 KONSTRUKCIJSKA RABA TERMIČNO MODIFICIRANEGA LESA

Les se velikokrat uporablja za konstrukcijske namene, saj je zaradi ugodnega razmerja med trdnostjo in težo zelo zaželen. Če je lesena konstrukcija pravilno narejena, lahko prenese precej velike obremenitve. Pri modificiranem lesu se gostota nekoliko zniža (za okoli 15 %), zato pade tudi upogibna trdnost. Ta padec je lahko tudi 25 %, zato je uporaba takšnega lesa v konstrukcijske namene vse prej kot priporočljiva, še posebej to velja za težje obremenitve (Silvaproduct, informativno gradivo, 2016).

3 MATERIALI IN METODE

Izdelali smo trislojne smrekove lepljence, ki se uporabljajo v proizvodnji oken in vrat. Lepljenci, dolžine 1900 mm, so bili narejeni iz lamel debeline 24 mm in širine 110 mm ter sestavljeni na štiri različne načine:

- vse tri lamele iz nemodificirane smrekovine,
- vse tri lamele iz termično modificirane smrekovine,
- ena zunanja lamela iz modificirane smrekovine, ostali dve iz nemodificirane,
- zunanji lameli iz modificirane smrekovine, srednja iz nemodificirane.

Uporabljena so bila tri različnim lepila:

- PVAc lepilo Rakoll GXL 4 Plus, proizvajalca H.B. Fuller Deutchland GmbH,
- PVAc lepilo Mekol D3, proizvajalca Mitol Sežana d.d.,
- PUR lepilo Purbond HB440, proizvajalca Collano Adhesives AG, Switzerland.

3.1 MATERIALI

3.1.1 Lepila

3.1.1.1 Rakoll GXL 4 Plus

Rakoll GXL 4 Plus je enokomponentno lepilo PVAc, z vodoodpornostjo razreda D4, ki ga proizvaja H.B. Fuller Deutchland GmbH. To je lepilo z izjemno vodoodpornostjo, ki mu ni potrebno dodajati utrjevalca. Njegova obstojnost je skladna s standardi DIN EN 204 – D4 in DIN EN 204 D4 ter WATT 91: $>7 \text{ N/mm}^2$.

Proizvajalec svetuje temperaturo prostora $18\text{--}20^\circ\text{C}$, nanos $150\text{--}180 \text{ g/m}^2$, odprti čas okrog 10 min, tlak stiskanja za mehke lesove $0,1\text{--}0,3 \text{ N/mm}^2$ ter čas stiskanja za lepljence 20–40 minut. Lepljenje se priporoča takoj po pripravi lesa; lepilni spoj je brezbarven, tudi če ga uporabljamo za lepljenje pri višjih temperaturah. Čiščenje je enostavno, saj ga lahko izvajamo z vodo (Tehnični list Rakoll GXL 4 Plus, 2004).

3.1.1.2 Mekol D3

Mekol D3 je prav tako enokomponentno PVAc lepilo, razreda D3. Proizvajalec je Mitol Sežana. Lepilo je dobro odporno na temperaturo in vodo po standardu DIN EN 204 – D3. Proizvajalec priporoča uporabo pri temperaturi 20°C , vlago lesa 8–10 % in relativno zračno vlažnost 60–70 %. Priporočljiv nanos je med 150 in 200 g/m^2 . Za mehkejšje lesove priporočajo pritisk okoli $0,2 \text{ N/mm}^2$. Odprti čas znaša 7 minut, čas stiskanja pa med 15 in 30 minut (mehki/trdi les). Lepilni spoj je brezbarven tudi v primeru lepljenja pri višji temperaturi. Čiščenje se izvaja z vodo (Tehnični list Mekol D3, 2005).

3.1.1.3 Purbond HB 440

Purbond HB 440 je reaktivno enokomponentno poliuretansko lepilo, proizvajalca Collano, Switzerland. Proizvedeno je brez topil in formaldehidov in za utrjevanje potrebuje vlago. Primerno je za vse lesene konstrukcije, pri katerih se zahteva odobritev nemškega standarda DIN 1052. Pri lameliranju se priporoča nanos med 200 in 300 g/m², odprti čas je okoli 30 minut. Bolj kot je les vlažen, tem krajši je čas, saj voda pospeši reakcijo utrjevanja. Isto velja, če je temperatura višja. Čas stiskanja je pri 20 °C, 65 % relativni zračni vlažnosti in 12 % vlažnosti lesa 2 uri. Tlak stiskanja pa je med 0,6 in 0,8 N/mm². Za čiščenje se priporoča PUR topilo Collano PUR solvent (Tehnični list Purbond HB 440, 2003).

3.1.2 Les

3.1.2.1 Smrekovina

Smreka (*Picea abies*) je ena glavnih predstavnikov drevesnih vrst v slovenskih gozdovih. Iz njenega lesa izdelujemo najrazličnejše izdelke, kot so pohištvo, okna, vrata pa tudi glasbila, za katera se uporablja tako imenovana resonančna smreka. Njeno naravno rastišče so gorski predeli, najdemo pa jo tudi v nižinah. Smrekov les je svetle, enakomerne barve in je mehak ter elastičen, gostota lesa je v povprečju 450 kg/m³. Naravna odpornost smreke je sicer nizka, vendar jo lahko z različnimi postopki modifikacije povečamo in ji razširimo območje uporabe (Brus, 2012).

3.2 PRIPRAVA LEPLJENCEV

3.2.1 Priprava lamel

Lamele smo našagali iz sušenega smrekovega lesa; debelina lamel je bila 30 mm, širina 120 mm. V proizvodnji lepljenega lesa lahko notranje sloje lepljencev sestavljajo lamele s tangencialno strukturo, v raziskavi pa so bile zaradi primerljivosti preizkusov uporabljene samo radialne lamele, ki so bile dolge 1900 mm. Za raziskavo smo potrebovali 72 lamel.



Slika 3: Žaganje na stroju za vzdolžno žaganje lesa.

3.2.2 Termična modifikacija lamel

Termična modifikacija je potekala po sistemu Silvapro Wood, ki ga izvaja podjetje Silvaprodukt. Gre za postopek modifikacije v vakuumski komori (Slika 4), kjer se vzpostavi inertna atmosfera in temperaturo med 180 in 230 °C (Silvaprodukt, informativno gradivo, 2016).

Lamele, namenjene izdelavi lepljencev, so bile pri 205 °C modificirane 3 ure. Temperatura je bila nekoliko nižja, saj se za izdelavo oken (zaradi potrebe po nosilnosti) uporablja blažje pogoje. Če bi modificirali lamele za zunanje stenske ali pa talne obloge, bi bila temperatura višja in tudi čas postopka bi bil daljši.



Slika 4: Komora za termično modifikacijo lesa v podjetju Silvaprodukt.



Slika 5: Primer spremembe dimenzij in barve lesa pri termični modifikaciji po postopku Silvapro Wood.

3.2.3 Skobljanje lamel

Po modifikaciji smo lamele skupaj z ostalimi (nemodificiranimi) skobljali na štiristranskem skobeljnem stroju Weinig Profimat 23E (Slika 6). Debelina skobljanih lamel je znašala 24 mm, kar je standardno pri lepljencih za okna in vrata, širina pa 110 mm. Opazili smo, da so bili ostanki pri modificiranem lesu veliko bolj drobni in fini, saj je ta material veliko bolj krhek kot pa nemodificirana smrekovina.



Slika 6: Štiristranski skobeljni stroj Weinig Profimat 23E.

3.2.4 Izdelava lepljencev

Po skobljanju smo tri lamele zlepili skupaj v lepljenec. Lepljenje je potekalo pri temperaturi 18 °C in relativni zračni vlažnosti 42 %. Uporabili smo dve PVAc lepili: Rakoll GXL 4 Plus in Mekol D3, ter PUR lepilo Purbond HB 440 (Slika 7). Nanašanje lepila je potekalo valjčno z ročnim valjčnim nanašalnikom (Slika 8); izbrali smo nanos 200 g/m². Izdelali smo 4 različne sestave lepljencev za 3 vrste lepil in po 2 enaki sestavi za vsako lepilo. Za vsako lepilo smo torej izdelali 8 lepljencev (4 kombinacije, po 2 primera za vsako kombinacijo) in uporabili naslednji sistem označevanja smrekovih lamel za štiri sestave lepljencev:

1. SM – SM – SM (nemodificirana – nemodificirana – nemodificirana)
2. TMS – SM – TMS (modificirana – nemodificirana – modificirana)
3. TMS – TMS – TMS (modificirana – modificirana – modificirana)
4. TMS – SM – SM (modificirana – nemodificirana – nemodificirana)

Tem oznakam pa smo pripisali še oznake za lepila:

1. RAK 1 (lepilo Rakoll GXL 4 Plus – 1. preizkušane)
2. RAK 2 (lepilo Rakoll GXL 4 Plus – 2. preizkušane)
3. MEK 1 (lepilo Mekol D3 – 1. preizkušane)
4. MEK 2 (lepilo Mekol D3 – 2. preizkušane)
5. PUR 1 (lepilo Purbond HB 440 – 2. preizkušane)
6. PUR 2 (lepilo Purbond HB 440 – 2. preizkušane)



Slika 7: Lepila Purbond HB 440, Mekol D3 in Rakoll GXL 4 Plus.



Slika 8: Valjčno nanašanje lepila z ročnim nanašalnikom Pfohl.

Po nanosu lepila je sledilo stiskanje. V večjih proizvodnjah imajo posebne stiskalnice za izdelavo lepljencev, mi pa smo stiskanje izvedli v stiskalnici za ploskovno lepljenje lesa Orma (Slika 9). S pomočjo grafa na stiskalnici (površina lepljencev/tlak olja), smo določili višino tlaka. Stiskali smo 8 lepljencev hkrati (za isto lepilo isti pogoji), vendar je bila skupna površina precej velika, zato smo lahko dosegli tlak stiskanja le $0,25 \text{ N/mm}^2$, kar je primerno za obe PVAc lepili, za poliuretansko pa je to nekoliko premalo. Vendar smo želeli za vse preizkušance doseči enake pogoje stiskanja, ki je trajalo 120 minut. Čas stiskanja je bil tako dolg, ker za utrjevanje PUR lepila nismo uporabili vode, ki pospeši utrjevanje.



Slika 9: Stiskanje v stiskalnici za ploskovno lepljenje Orma.

3.2.5 Obdelava lepljencev

Za vsa tri uporabljena lepila je priporočljivo, da se nadaljnja obdelava lepljencev prične po 24 urah; mi smo lepljence nadalje obdelali šele po 72 urah, da se je lepilo lahko v celoti utrdilo. Obdelava je potekala na kombiniranem poravnalno-debelinskem skobeljnem stroju SCM Linvincibile 2000d (Slika 10). Lepljence smo najprej poravnali po robu in nato skobljali na širino 100 mm. Po debelini nismo skobljali, ker smo želeli ohraniti enotne debeline vseh treh lamel.



Slika 10: Skobljanje lepljencev na kombiniranem poravnalno-debelinskem skobeljnem stroju SCM Linvincibile 2000d.

3.3 PRIPRAVA PRIZKUŠANCEV ZA UPOGIBNI IN STRIŽNI TEST

Po skobljanju smo lepljence pripravili za preizkušanje. Za preizkus upogibne trdosti smo uporabili lepljence dolžine 1400 mm, iz preostalih delov pa smo izdelali kose za preizkus

strižne trdnosti lepilnega spoja. Preizkušance (dimenzije preizkušancev so bile 49 x 49 mm) smo razžagali in označili po sistemu, ki je prikazan na Sliki 10. Iz vsakega lepljenca smo izžagali štiri preizkušance in jih označili s števili od 1 do 4.



Slika 11: Primer izdelave in označevanja strižnih preizkušancev (zgoraj od desne proti levi 1. in 2. preizkušanec, spodaj od desne proti levi pa 3. in 4. preizkušanec).

Pri označevanju strižnih preizkušancev nismo označevali sestave, saj je bila vidna, vendar pa smo jo med izvajanjem strižnih testov vpisali v računalniški program. Preizkušance naj bi pri upogibnem testu izžagali neposredno v bližini loma, vendar smo predvidevali, da bodo poškodbe pri upogibu velike in smo zato elemente za strig izžagali iz preostanka lepljenca, ki je bil na začetku dolg 1900 mm, za upogibno trdnost pa smo potrebovali elemente dolžine le 1400 mm. Pri označevanju preizkušancev za upogibni test smo uporabili prvotni sistem označevanja, ki je opisan v poglavju **3.1.4**.



Slika 12: Žaganje na čelilnem stroju OMGA.

3.4 METODE DELA

Po pripravi preizkušancev v mizarski delavnici smo začeli s testiranjem na univerzalnem testirnem stroju Zwick Roell Z100.

3.4.1 Merjenje preizkušancev za upogibni test

Pri upogibnem testu smo s kljunastim merilom izmerili debelino in širino preizkušanca (Slika 13). Obe dimenziji smo merili na sredini preizkušanca (700 mm stran od čela).

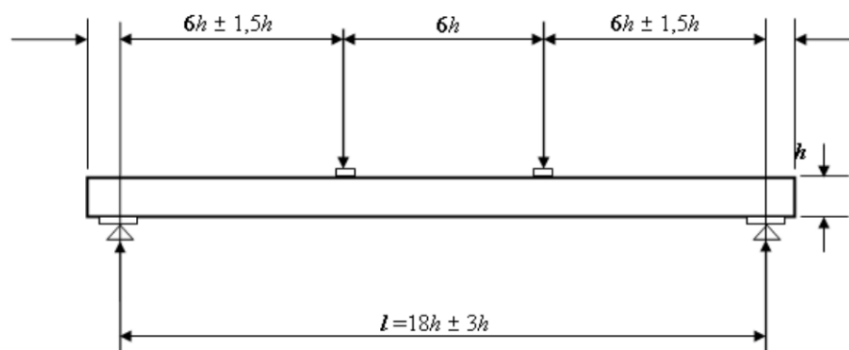


Slika 13: Merjenje širine z digitalnim kljunastim merilom.

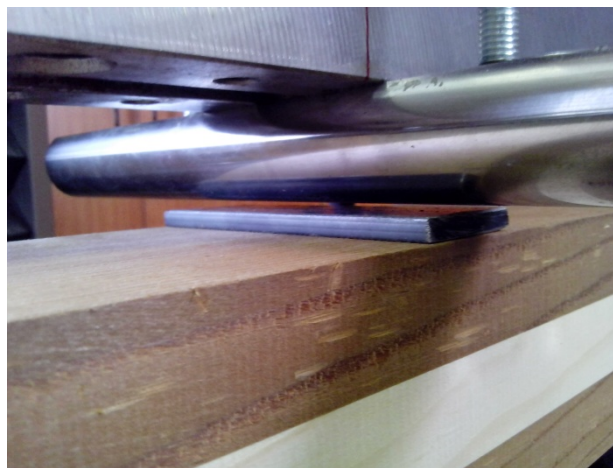
3.4.2 Ugotavljanje upogibne trdnosti

Za ugotavljanje upogibne trdnosti smo uporabili štiritočkovni upogib po standardu SIST EN 408: 2010. Testiranje smo izvedli na univerzalnem testirnem stroju Zwick Roell Z100.

Glede na zahteve standarda SIST EN 408 smo dve podpori nastavili na razmik 1290 mm, kar je 18-kratnik debeline oziroma višine vzorca, ki je znašala 72 mm. Ostala dva pritiska valja smo postavili na tretjini celotnega razmika, kar je znašalo 430 mm (Slika 14). Dolžina celotnega preizkušanca je morala znašati najmanj 19-kratnik debeline, kar je 1368 mm, naši vzorci so bili dolgi 1400 mm. Pri ugotavljanju upogibne trdnosti je priporočljiva uporaba vrtljivih podpornih in pritisknih valjev, da nosilec pri upogibu zdrsne in ne pride do prevelikih vtiskov. Da vtiski ne bi bili preveliki, smo na vsak valj namestili jekleno ploščico dolžine 100 mm (toliko je bil širok preizkušanelec) in širine 30 mm (Slika 15). Ploščice glede na zahtevo standarda SIST EN 408: 2010 ne smejo biti širše od polovice debeline preizkušanca.



Slika 14: Shema štiritočkovnega upogibnega preizkusa (standard SIST EN 408: 2010).



Slika 15: Primer vstavitve železne ploščice pod pritiski valj.

Hitrost pomika pritisknih valjev je bila 0,216 mm/s. Preizkus je bil končan, če se je lepljenec prelomil, oziroma če je pritiska sila padla za 80 %. Veliko je bilo primerov, ko je sila padla za manjši delež in se nato ni več bistveno spremenila. Če se sila ni več dvignila nad prejšnjo maksimalno vrednost, smo test prekinili. Univerzalni testirni stroj je meril tudi čas od začetka testa pa do takrat, ko je prišlo do loma, oziroma prej omenjenega padca sile. Upogibno trdnost preizkušanca je program testXpert, s katerim smo upravljali testirni stroj, izračunal po enačbi 1.

Pri preizkušancih sestave modificirana – nemodificirana – nemodificirana lamela smo lepljenec postavili tako, da je bila modificirana lamela na spodnji, natezni strani.



Slika 16: Štiritočkovni preizkus upogibne trdnosti na napravi Zwick Roell Z100.

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2} \quad \dots(1)$$

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16l(w_2 - w_1)} \quad \dots(2)$$

V raziskavi smo ugotavljali tudi modul elastičnosti. Poves smo merili z merilnikom Heidenhain MT 12 (Slika 17), ki smo ga namestili na sredino lepljenca (na spodnjo stran) in ga odstranili, ko je bil poves večji od 6 mm. Program je modul elastičnosti izračunal po enačbi 2.



Slika 17: Merilnik Heidenhain MT 12 za merjenje povesa, postavljen na sredino preizkušanca.

3.4.3 Merjenje preizkušancev za strižni preizkus

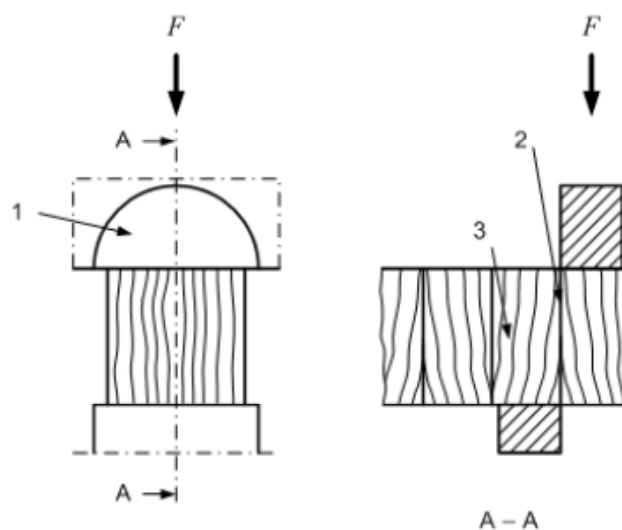
Preizkušance smo našagali tako, da so imeli kvadratni presek z dimenzijo stranice 49 mm. Tudi za preizkus strižne trdnosti lepilnega spoja smo v računalnik vnesli natančne dimenzije, izmerjene z digitalnim kljunastim merilom (Slika 18). Pri vsakem preizkušancu smo morali preizkusiti dva lepilna spoja, saj so bili lepljenci sestavljeni iz treh lamel.



Slika 18: Merjenje višine preizkušanca za strižni test z digitalnim kljunastim merilom.

3.4.4 Ugotavljanje strižne trdnosti lepilnih spojev

Tudi te meritve smo opravili na univerzalnem testirnem stroju Zwick Roell Z100. Preizkušance smo vstavili v primež in z jih z vijaki in železno ploščico pritrdili, da se med preizkusom ne bi premikali, ter nato začeli s testiranjem. Poskrbeli smo, da je bil lepilni spoj čim bližje pritisknemu elementu. Standard SIST EN 14080: 2012 narekuje, da ne smemo zgrešiti lepilnega spoja za več kot 1 mm. Preizkušance smo postavili tako, da je tlak deloval na prečni prerez lesa tako, da ne pride do tlačnih deformacij preizkušanca (Slika 19 in Slika 21). Pomik pritisknega elementa je bil 2 mm/min. Hitrost smo določili tako, da ni prišlo do loma prej kot v 20 s. Program nam je strižno trdnost izračunal po enačbi 3 (standard SIST EN 14080: 2012).



Slika 19: Shema strižnega preizkusa po standardu SIST EN 14080: 2012 (standard SIST EN 14080: 2012).

$$f_v = k \frac{F_u}{A} \quad \dots (3)$$

V raziskavi smo želeli ugotoviti, katero lepilo je primernejše za lepljenje različnih kombinacij lepljencev iz termično modificirane in nemodificirane smrekovine. Predvsem nas je zanimal spoj med nemodificirano in modificirano smrekovino, pa tudi spoj med dvema modificiranima lamelama.



Slika 20: Strižni preizkus na napravi Zwick Roell Z100.



Slika 21: Primer postavitve preizkušanca (pogled z vrha, s smeri pritisnega valja).

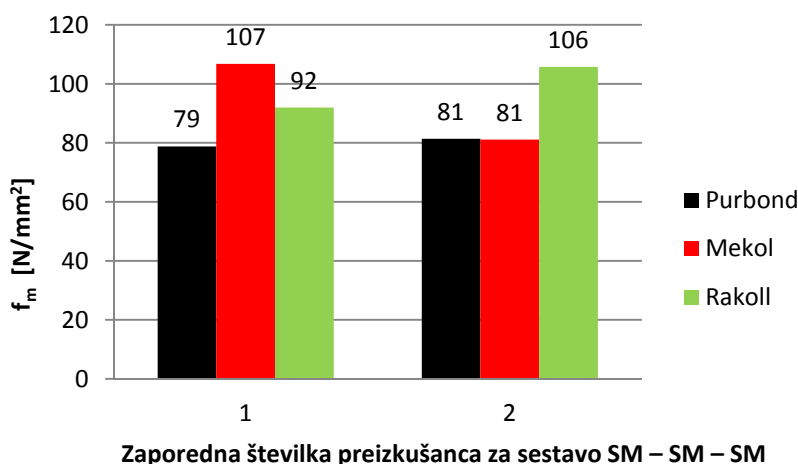
Vse meritve, ki smo jih izvajali pri preizkušanju, so bile zbrane v programu testirnega stroja test Xpert II. Podatke smo nato izvozili v Excelovo datoteko in jih obdelali.

4 REZULTATI

4.1 UPOGIBNA TRDNOST

4.1.1 Lepljenci sestave SM – SM – SM

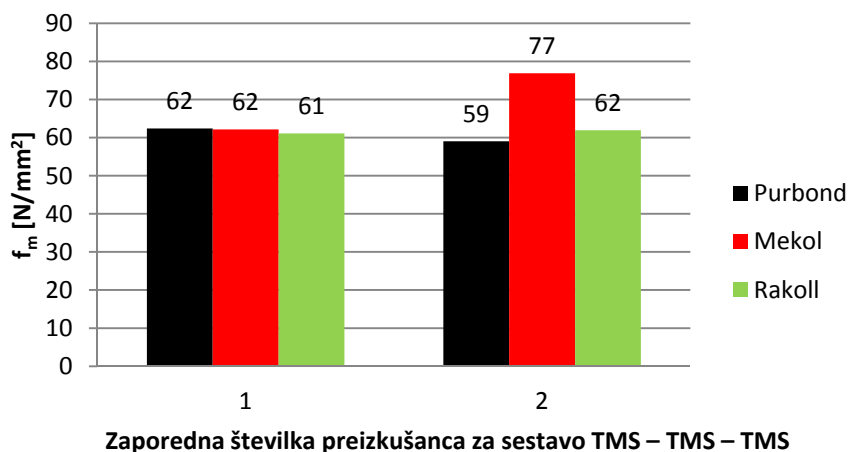
Lepljenca, ki sta imela vse lamele iz nemodificirane smrekovine, smo uporabili za kontrolna preizkušanca (Slika 22). Večjo nosilnost smo pričakovali pri lepljencih, lepljenih s PUR lepilom. Rezultati so pokazali povprečno upogibno trdnost preizkušancev, ki se je gibala med 80 in 85 N/mm². Nekaj večjih odstopanj je bilo pri obeh PVAc lepilih. Rezultat prvega preizkušanca, zlepljenega z lepilom Mekol D3, je bil za približno 25 N/mm² višji od ostalih dveh. Menimo, da je na večjo upogibno trdnost preizkušanca vplival tudi ugodnejši potek lesnih vlaken. Primerljive rezultate pa smo dobili za lepili Rakoll in Purbond.



Slika 22: Upogibna trdnost kontrolnih lameliranih preizkušancev (SM – SM – SM), lepljenih z različnimi lepili.

4.1.2 Lepljenci sestave TMS – TMS – TMS

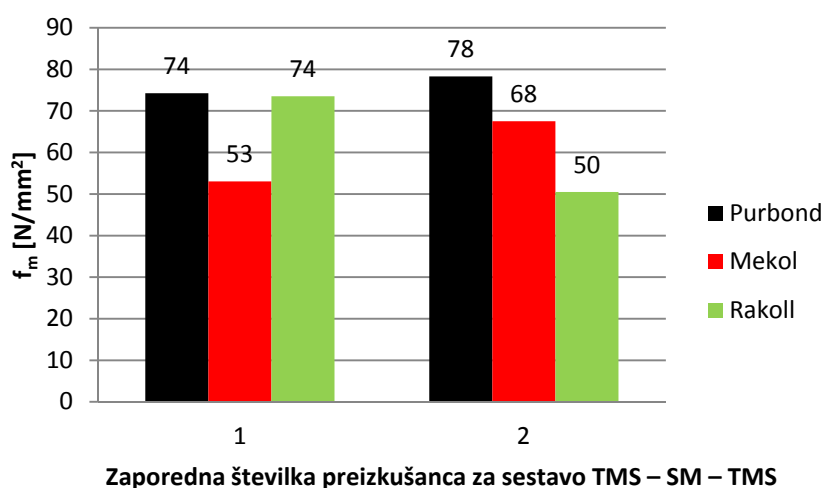
Pri lepljencih, ki so imeli modificirane vse tri lamele (Slika 23), so bile večinoma vse vrednosti približno za 20 N/mm² manjše, kot pri lepljencih, ki so bili sestavljeni iz nemodificiranih lamel. Upogibne trdnosti preizkušancev so se gibale okrog 60 N/mm². Dobljeni rezultati so bili enotnejši kot pri prejšnji sestavi; odstopal je le 2. lepljenec, zlepljen z lepilom Mekol D3. Njegova upogibna trdnost je bila za približno 25 N/mm² višja od ostalih petih in skoraj primerljiva s kontrolnimi preizkušanci.



Slika 23: Upogibna trdnost lameliranih preizkušancev (TMS – TMS – TMS), lepljenih z različnimi lepili.

4.1.3 Lepljenci sestave TMS – SM – TMS

Na grafu (Slika 24) so prikazani rezultati za upogibno trdnost lepljencev, ki so imeli zunanji dve lameli modificirani, notranjo pa nemodificirano. Tu smo pričakovali nekoliko višjo trdnost kot pri lepljencih, ki so imeli vse tri lamele modificirane. Rezultati so to večinoma potrdili, več odstopanj je bilo le pri PVAc lepilih. Pri lepilu Rakoll GXL 4 Plus je upogibna trdnost za drugi preizkušaneec znašala le 50 N/mm²; podoben rezultat smo dobili tudi pri prvem preizkušancu, lepljenim z lepilom Mekol D3. Lepljenca, lepljena s PUR lepilom, sta dosegla najvišjo upogibno trdnost (75 N/mm²), kar je primerljivo s preizkušanci sestave SM – SM – SM.

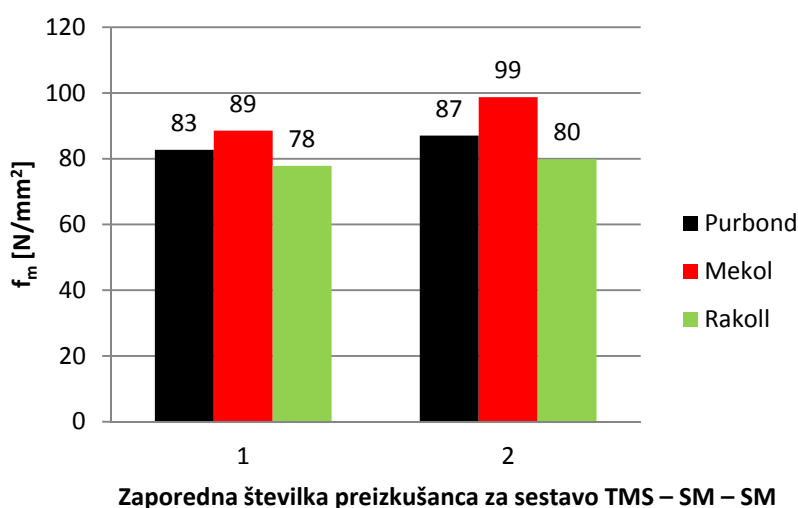


Slika 24: Upogibna trdnost lameliranih preizkušancev (TMS – SM – TMS), lepljenih z različnimi lepili.

4.1.4 Lepljenci sestave TMS – SM – SM

Ta lepljenec je za proizvajalce oken najprimernejši, saj ima na zunanji strani modificirano lamelo, na notranji pa nemodificirano. Nemodificirana lamela je svetlejša in ustreza kupcem, ki želijo imeti dvobarvna okna (običajno na notranji strani svetlejše). Vendar morata biti obe barvi sprejemljivi, saj je v nasprotnem primeru potrebno dvakratno premazovanje, ki izdelavo oken podraži.

Pri tem preizkusu je bila modificirana lamela na spodnji, natezni strani. Pričakovali smo, da bo imela sestava TMS – SM – SM višjo upogibno trdnost od sestave TMS – SM – TMS in nižjo od sestave SM – SM – SM. Dobljeni rezultati so bili precej podobni rezultatom kontrolnih preizkušancev (Slika 25). Upogibna trdnost se je pri lepilih Purbond in Rakoll gibala v območju 80 N/mm^2 , odstopala pa sta lepljenca za lepilo Mekol D3, pri katerih sta bila rezultata preizkusa višja tudi za okoli 15 N/mm^2 (Slika 25).

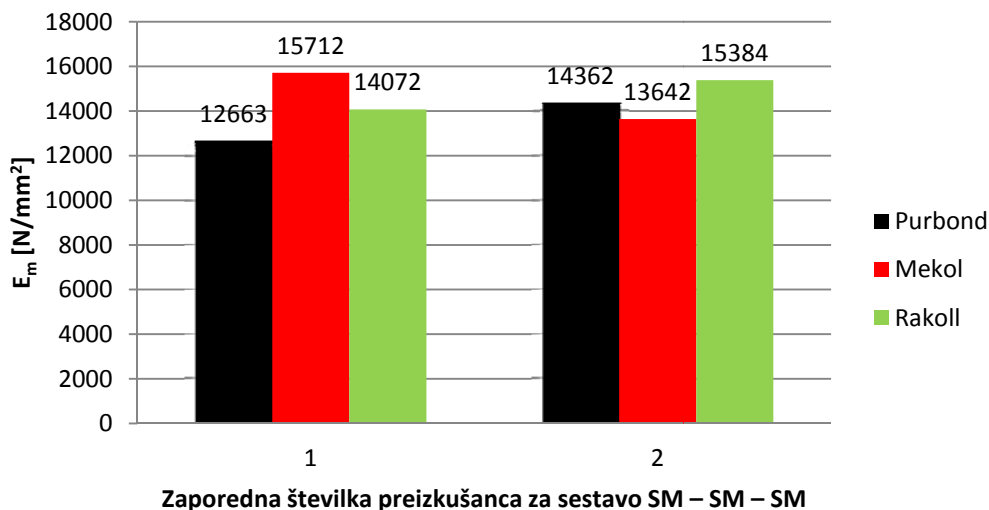


Slika 25: Upogibna trdnost lameliranih preizkušancev (TMS – SM – SM), lepljenih z različnimi lepili.

4.2 MODUL ELASTIČNOSTI

4.2.1 Lepljenci sestave SM – SM – SM

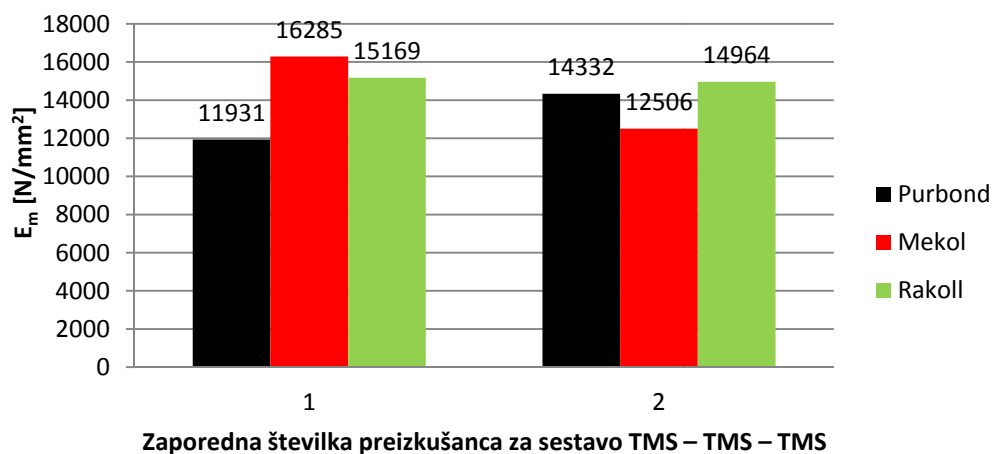
Na Sliki 26 so prikazani rezultati preizkusa za lepljence SM – SM – SM, pri katerih je bil modul elastičnosti v povprečju okoli 14000 N/mm^2 . Pri lepljencih z lepilom Purbond, odstopajo rezultati prvega preizkušanca, ki je imel modul elastičnosti približno 1500 N/mm^2 nižji od povprečja; medtem ko je imel prvi preizkušanec z lepilom Mekol modul elastičnosti višji za okoli 1500 N/mm^2 . Tudi drugi preizkušanec, zlepljen z lepilom Rakoll, odstopa od povprečja za približno enako vrednost.



Slika 26: Modul elastičnosti lameliranih preizkušancev (SM – SM – SM), lepljenih z različnimi lepili.

4.2.2 Lepljenci sestave TMS – TMS – TMS

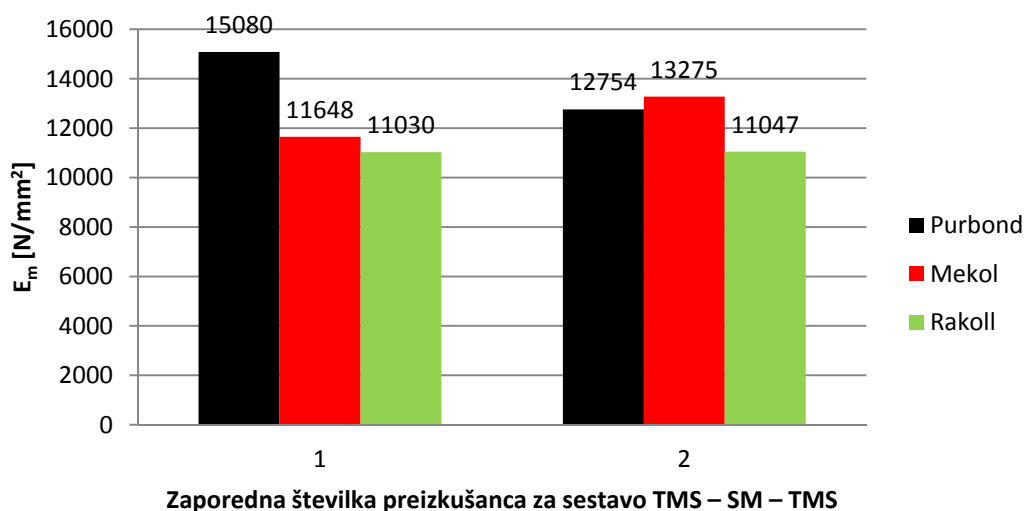
Glede na teorijo, ki pravi, da postane les po termični modifikaciji bolj krhek, smo pričakovali višje module elastičnosti pri preizkušancu, ki je bil sestavljen iz modificiranih lamel, kot pri kontrolnem preizkušancu iz nemodificiranih. Rezultati (Slika 27) so to potrdili. Povprečni modul elastičnosti se je pri lepljencih te sestave gibal okoli 14500 N/mm².



Slika 27: Modul elastičnosti lameliranih preizkušancev (TMS – TMS – TMS), lepljenih z različnimi lepili.

4.2.3 Lepljenci sestave TMS – SM – TMS

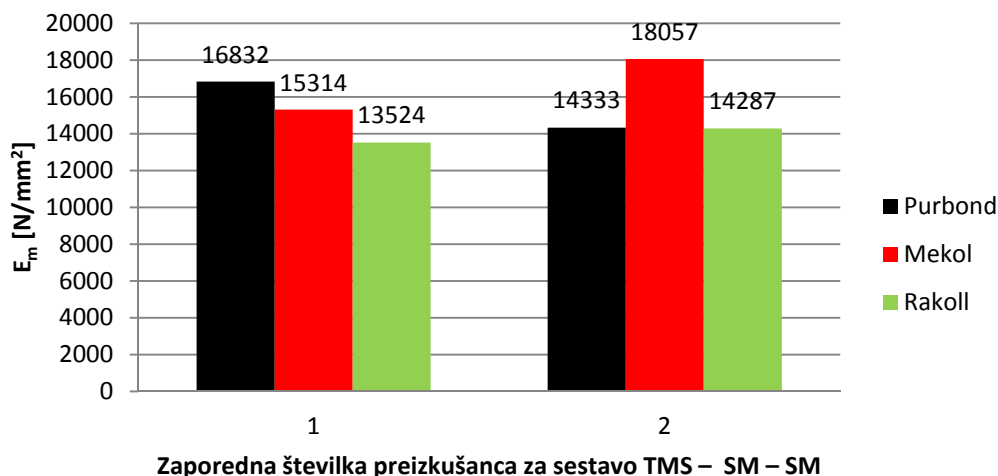
Na Sliki 28 so prikazani rezultati za sestavo, ki je imela zunanji lameli modificirani, srednjo pa nemodificirano. Pričakovali smo nekoliko višje vrednosti kot pri lepljencih iz nemodificiranih lamel. V povprečju se je modul elastičnosti gibal okrog 12000 N/mm^2 , kar je nekoliko manj kot pri kontrolnih lepljencih. Največji modul elastičnosti je imel prvi lepljenec, zlepljen s Purbond lepilom (15080 N/mm^2), najmanjše vrednosti pa so dosegli lepljenci, zlepljeni z lepilom Rakoll.



Slika 28: Modul elastičnosti lameliranih preizkušancev (TMS – SM – TMS), lepljenih z različnimi lepili.

4.2.4 Lepljenci sestave TMS – SM – SM

Pri sestavi lepljenca TMS – SM – SM smo pričakovali malo višje vrednosti kot pri kontrolnem preizkušancu, saj naj bi imela lamela iz modificirane smrekovine višji modul elastičnosti. Rezultati so pokazali nekaj odstopanj od povprečja, ki se je gibalo okoli 14500 N/mm^2 (Slika 29).



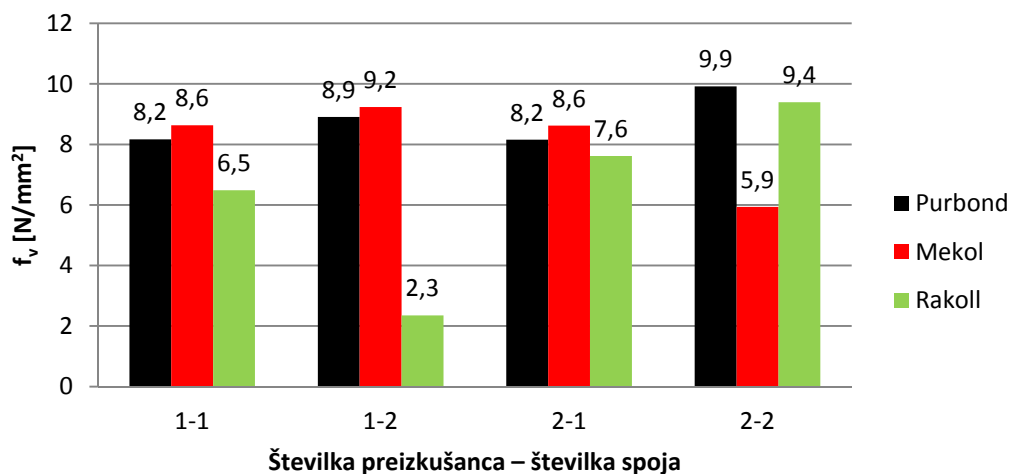
Slika 29: Modul elastičnosti lameliranih preizkušancev (TMS – SM – SM), lepljenih z različnimi lepili.

4.3 STRIŽNA TRDNOST

Strižno trdnost smo ugotavljali na obeh spojih lepljenca. Rezultati v grafih so podani tako, da je pod vsakim stolpcem najprej prikazana številka lepljenca, sledi pa ji številka spoja. Prvi spoj je bil pri lepljenju vedno na vrhu, kar je bilo še posebej pomembno pri lepljencu, ki je imel eno lamelo modificirano, ostali dve pa nemodificirani. Poleg strižnih trdnosti so podane še ocene deleža loma po lesu v %, ki smo jih ocenjevali vizualno, na 10 % natančno. Vrednosti so prikazane kot povprečje štirih meritev za vsak spoj. Za vsak lepljenec smo opravili 8 preizkusov strižne trdnosti lepilnega spoja.

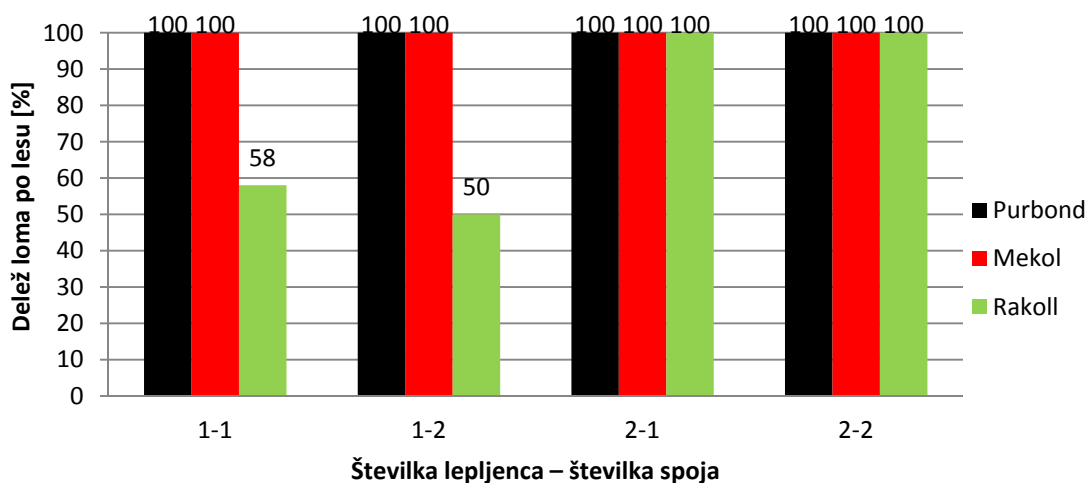
4.3.1 Lepljenci SM – SM – SM

Za te lepljence lahko rečemo, da so kontrolni, saj gre za spoje med dvema nemodificiranima lamelama (Slika 30). Strižne trdnosti so se gibale okoli 8 N/mm². Standard SIST EN 14080: 2013 za lesene konstrukcije (lepljeni lamelirani les in lepljeni masivni les) pravi, da je minimalna strižna trdnost večja ali enaka 6 N/mm² (pri vsaj 90 % lomu po lesu). Za kritične torej lahko vzamemo druge spoje (1 – 2) pri prvem preizkušancu, ki je bil zlepljen z lepilom Rakoll.



Slika 30: Strižna trdnost spojev v lameliranih preizkušancih (SM – SM – SM), lepljenih z različnimi lepili.

Deleži loma po lesu (Slika 31) so bili 100 %, z izjemo lepilnih spojev pri prvem preizkušancu, zlepljenim z lepilom Rakoll.

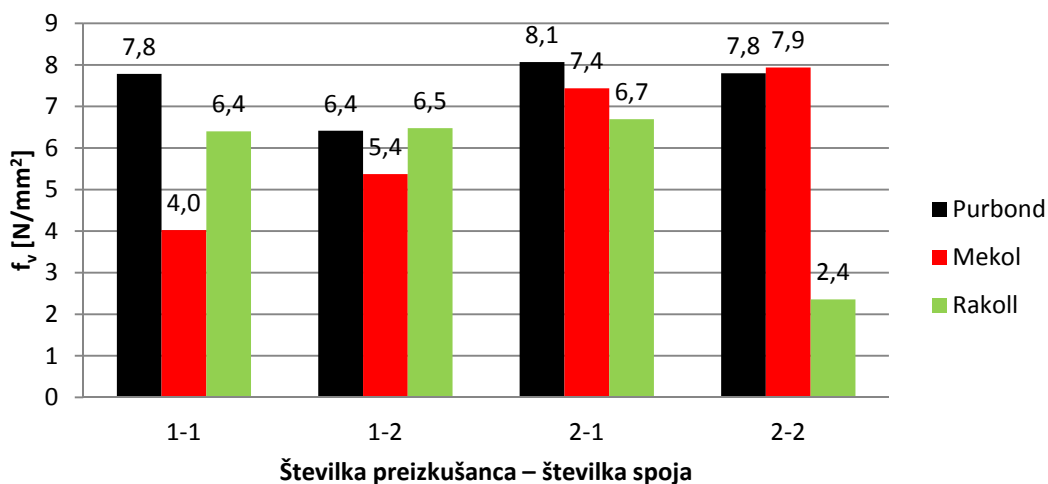


Slika 31: Delež loma po lesu pri preizkušancih (SM – SM – SM), lepljenih z različnimi lepili.

4.3.2 Lepljenci TMS – TMS – TMS

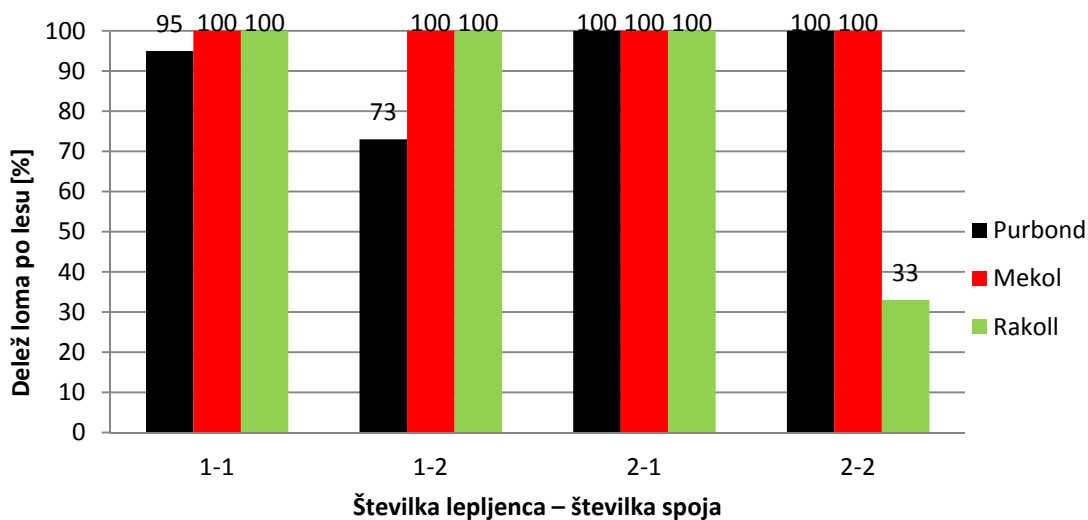
Strižne trdnosti spojev nemodificiranih lepljencev so bile v povprečju nižje kot pri prejšnji sestavi (Slika 32).

Pri rezultatih za lepilo Purbond ni bilo večjih odstopanj, medtem ko so se povprečja strižnih trdnosti obeh PVAc lepil gibala od 2 N/mm² pa tudi do 7 N/mm² (Mekol). Posebej kritični so bili spoji 1 – 1 za lepilo Mekol in spoji 2 – 2 za lepilo Rakoll.



Slika 32: Strižna trdnost spojev v lameliranih preizkušancih (TMS – SM – TMS), lepljenih z različnimi lepili.

Deleži loma po lesu so bili zelo veliki (Slika 33). Kjer je bila strižna trdnost za lepilo Mekol najslabša, je popustil les, ne pa lepilni spoj. Obratno pa se je izkazalo za spoje 2 – 2 pri lepilu Rakoll, kjer je bila majhna strižna trdnost dokazana tudi z deležem loma – torej je prišlo do loma po lepilnem spoju.

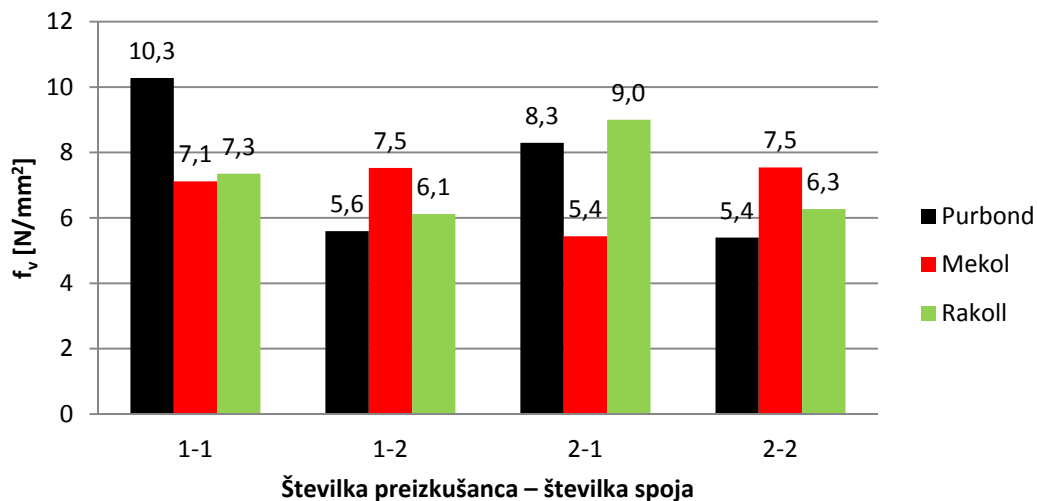


Slika 33: Delež loma po lesu pri preizkušancih (TMS – TMS – TMS), lepljenih z različnimi lepili.

4.3.3 Lepljenci TMS – SM – TMS

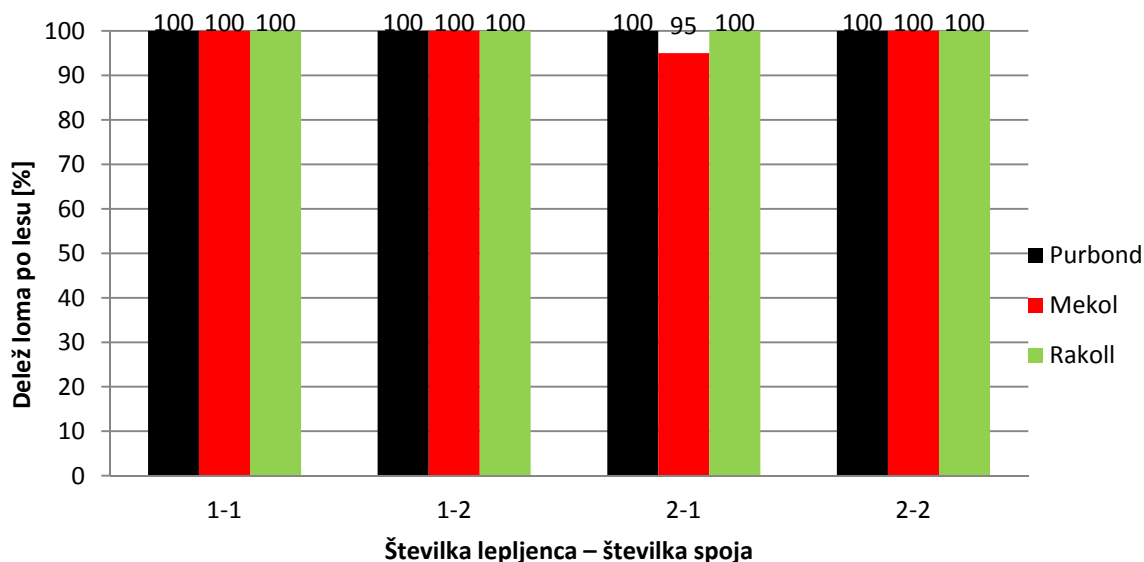
Pri tej kombinaciji lepljencev so bili vsi spoji sestavljeni iz ene modificirane lamele in druge nemodificirane. Dobljeni rezultati so si precej različni (Slika 34): pri lepilu Purbond

smo imeli dve najvišji vrednosti ($10,3 \text{ N/mm}^2$ in $8,3 \text{ N/mm}^2$) in dve najnižji ($5,6$ oz $5,4 \text{ N/mm}^2$), medtem ko rezultati za obe PVAc lepili niso pokazali tako velikih odstopanj. Njihovo povprečje znaša približno $6,5 \text{ N/mm}^2$, kar je v skladu s standardom SIST EN 14080: 2013.



Slika 34: Strižna trdnost spojev v lameliranih preizkušancih (TMS – SM – TMS), lepljenih z različnimi lepili.

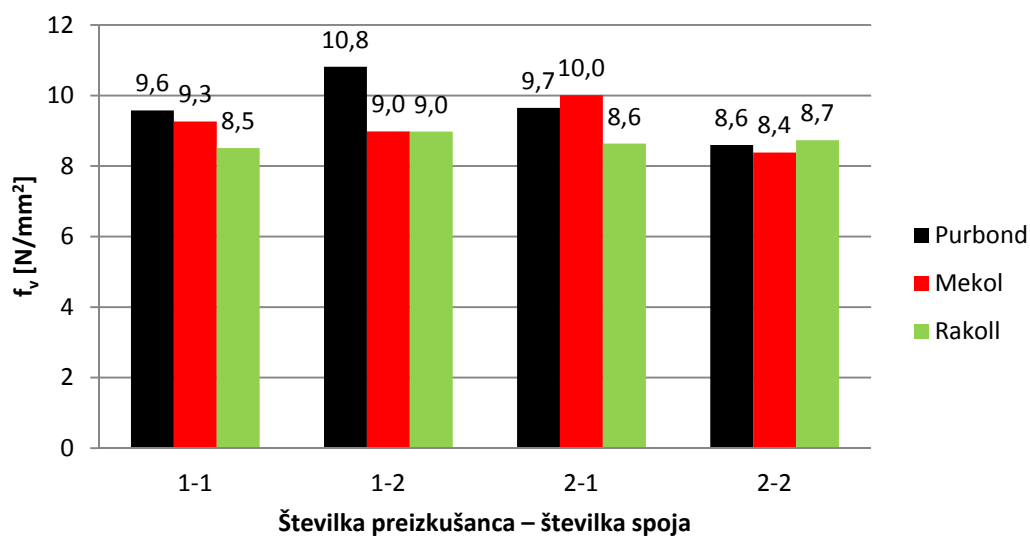
Deleži loma po lesu so bili 100 % (Slika 35), malo je odstopalo le lepilo Mekol pri spojih 2 – 1 (95 %). Povzamemo lahko, da je bila trdnost lepilnih spojev zelo dobra.



Slika 35: Deleži loma po lesu pri preizkušancih (TMS – SM – TMS), lepljenih z različnimi lepili.

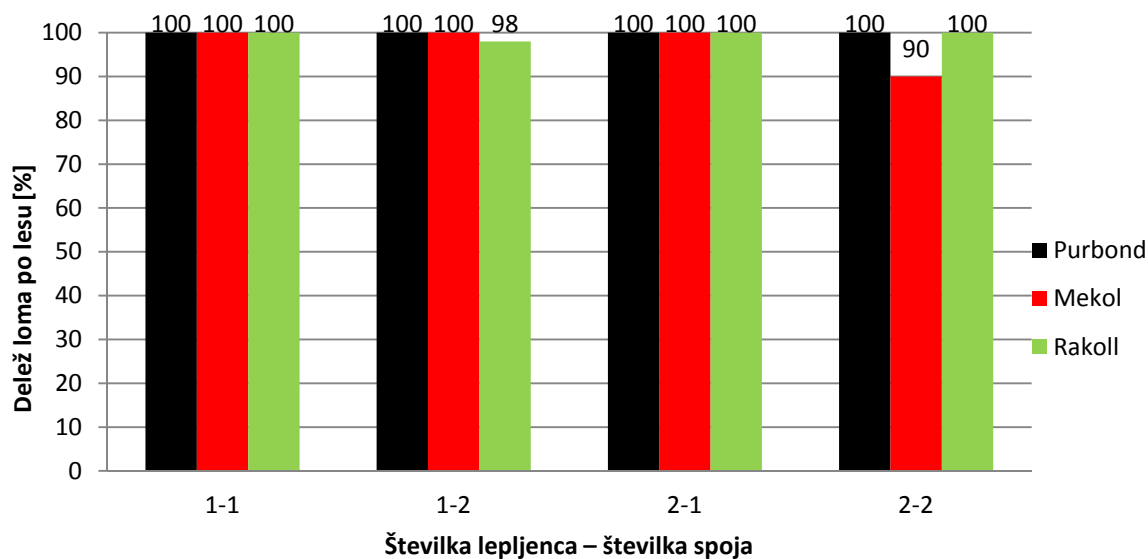
4.3.4 Lepljenci sestave TMS – SM – SM

Rezultati (Slika 36) niso pokazali velikih odstopanj med spojem dveh nemodificiranih lamel (stolpca 1 – 2, 2 – 2) in spojem modificirane in nemodificirane lamele (stolpca 1 – 1 in 2 – 1). Tako pri prvem kot tudi pri drugem spoju so vrednosti podobne. Ugotovili smo, da so spoji med nemodificiranima lamelama zdržali celo nekoliko manjše obremenitve, z izjemo spojev v prvem lepljencu, zlepljenih z lepilom Purbond.



Slika 36: Strižna trdnost spojev v lameliranih preizkušancih (TMS – SM – SM), lepljenih z različnimi lepili.

Delež loma po lesu je nekoliko manjši pri lepilu Mekol (spoj 2 – 2; 90 %), kar je razvidno na Sliki 37. Tudi za to sestavo lahko rečemo, da so spoji zelo dobri, saj je večino spojev popustilo po lesu.



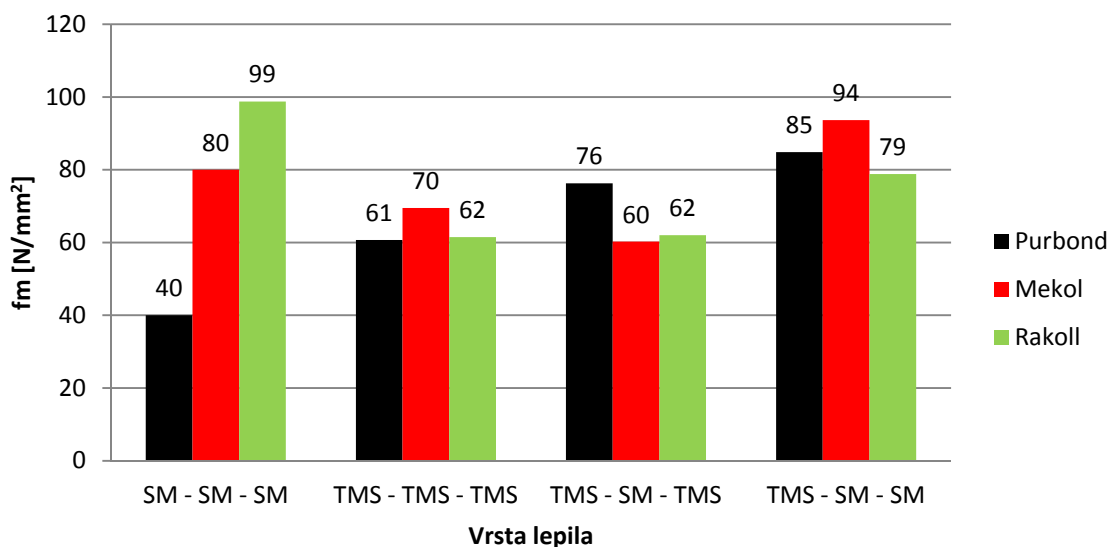
Slika 37: Delež loma po lesu pri preizkušancih (TMS – SM – SM), lepljenih z različnimi lepili.

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

5.1.1 Upogibna trdnost

Pričakovali smo, da bodo največje obremenitve zdržali lepljenci, ki imajo vse tri lamele iz nemodificirane smrekovine. Vrednosti za upogibno trdnost za omenjene lepljence gibale okrog 80 N/mm^2 , z izjemo preizkušancev, lepljenih z lepilom Purbond (Slika 38).



Slika 38: Povprečja upogibnih trdnosti.

Glede na lastnosti PUR lepil, ki se največ uporabljajo v konstrukcijske namene, smo domnevali, da bodo preizkušanci, zlepljeni s tem lepilom, zdržali večje obremenitve od preizkušancev, zlepljenih s PVAc lepili. Vendar so bili dobljeni rezultati drugačni, saj so imeli nekateri lepljenci, zlepljeni s PVAc lepili, višjo upogibno trdnost. Menimo, da je glavni razlog za to, ugodnejši potek vlaken v lamelah. Šlo je namreč za trislojne lepljence, pri katerih ima kakovost lesa zunanjih lamel največji vpliv na višino upogibne trdnosti. V raziskavi smo skušali zagotoviti enako surovino za vse preizkušance (uporaba radialnih lamel), vendar pa je les heterogen material in nikoli ni mogoče dobiti 100 % zanesljivih rezultatov. Za natančnejše rezultate bi bilo potrebno narediti več preizkusov.



Slika 39: Močno ukrivljen lepljenec, vendar loma še ni.

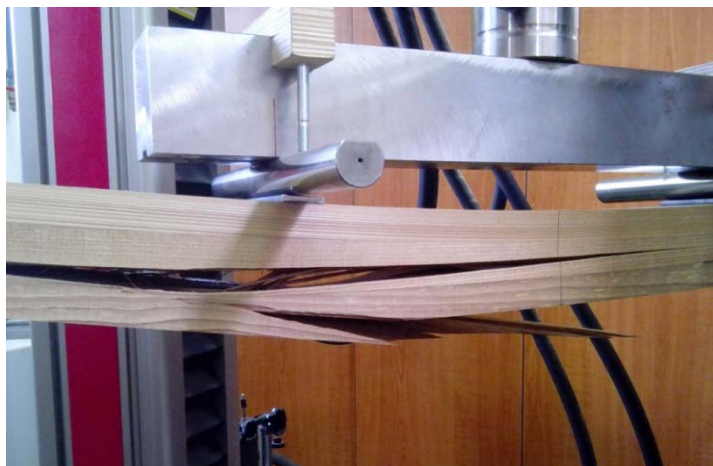
Prelomi so večinoma potekali po lesu, prišlo pa je tudi do loma po lepilnem spoju oziroma delaminacije (Slika 40), verjetno zaradi predolgega odprtega časa lepljenja, ali pa je šlo za tanjšo lamelo, ki je bila zaradi uporabe ploskovne stiskalnice za stiskanje več preizkušancev hkrati stisnjena z manjšim tlakom. V največ primerih je šlo za veliko poškodbo, kjer se je večji kos lesa odlomil skoraj po celotni dolžini preizkušanca.



Slika 40: Primer delaminacije.

Lepljenci iz treh modificiranih lamel so pričakovano zdržali najmanjše obremenitve. Raziskave so pokazale, da je lahko padec upogibne trdnosti pri modifikaciji lesa tudi do 25 % (Silvaprodukt, informativno gradivo, 2016). Če vzamemo, da je povprečna upogibna trdnost modificiranih lepljencev 60 N/mm^2 (Slika 38), nemodificirane smrekovine pa 80 N/mm^2 , lahko rečemo, da je padec okrog 25 %, kar pa ni malo. Zaradi tega rabo modificiranega lesa v konstrukcijske namene priporočamo le ob ustreznem dimenzioniranju elementov, za izdelavo oken s težjimi stekli (panoramske stene) pa svetujemo uporabo debelejših profilov ali pa lepljenje stekla v krilo. Pri rezultatih te sestave ni bilo velikih odstopanj, kar pomeni, da so imele vse lamele podobne lastnosti (potek vlaken, gostota, vlažnost).

Poškodbe, ki so se pojavljale ob lomu, so bile precej velike, ker je termično modificiran les bolj krhek. Spodnja lamela je bila najbolj poškodovana; posamezne trske so odpadle že med trajanjem poskusa. Na Sliki 41 vidimo primer, pri katerem sta se na enem preizkušancu pojavila dva neodvisna loma. Prvi se je pojavil na spodnji lameli in je kratek – gre za prelom po braniki, lom na srednji lameli pa je potoval po dolžini lamele, kar dokazuje, da je bil potek vlaken idealen. Do delaminacije ni prišlo, saj je prej popustila lamela kot lepilni spoj.



Slika 41: Poškodbe pri lepljencu iz termično modificiranih lamel.

Nekoliko boljše lastnosti kot pri preizkušancu z vsemi modificiranimi lamelami smo pričakovali pri lepljencu, ki ima zunanji lameli modificirani notranje pa ne. Predvidevali smo, da bo srednja lamela predstavljala neko ojačitev (razen v primeru popustitve lepilnega spoja). Večinoma so se predvidevanja uresničila, nekoliko manjše vrednosti smo dobili le pri prvem preizkušancu, zlepljenim z lepilom Mekol, in drugem z lepilom Rakoll. Pri lepilu Mekol je prišlo tudi do delaminacije (Slika 42), vendar je bila na modificirani lameli prisotna napaka. Sklepamo, da se je modificirana lamela pri skobljanju nekoliko več odskobljala in lameli na tem mestu nista imeli zadostnega stika. K nizki upogibni trdnosti je nekoliko pripomogel tudi potek lesnih vlaken.



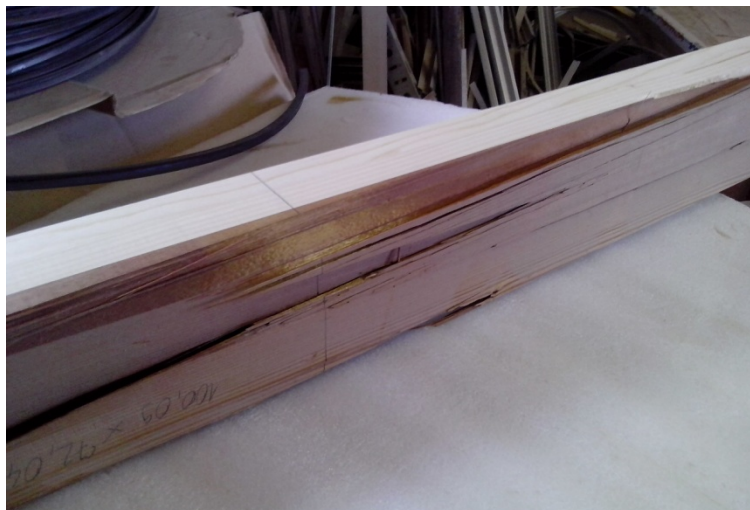
Slika 42: Delna delaminacija in prelom po lesu.

Najbolj presenetljive rezultate smo dobili pri lepljencih, ki so imeli modificirano samo eno zunanjo lamelo. Povprečna upogibna trdnost je bila enaka kot pri kontrolnem vzorcu, torej od 80 do 85 N/mm². Modificirana lamela je bila na spodnji, natezni strani. Pri prelomih smo opazili, da so imele modificirane lamele precej bolj ugoden potek vlaken kot pa lamele pri nemodificiranem lepljencu (Slika 43).



Slika 43: Prelom po braniki (ugoden potek vlaken).

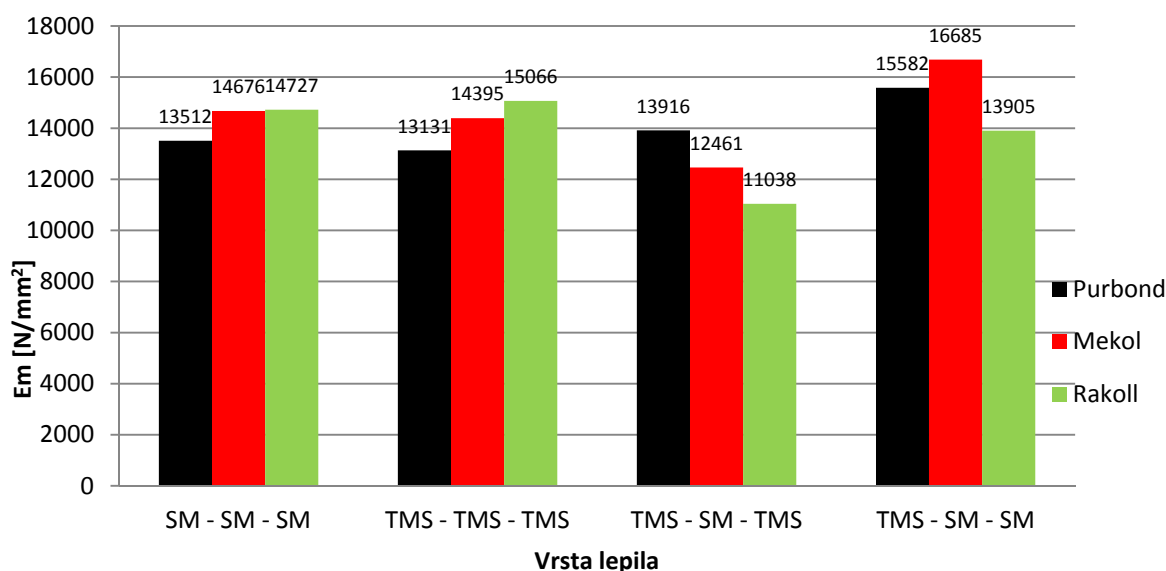
Zanimive so bile poškodbe pri zadnji kombinaciji lamel, ki so prikazane na Sliki 44. Opazili smo, da so največje poškodbe zaradi velikih napetosti, ki so se pojavile pred lomom, nastale na modificiranih lamelah. Nekatere modificirane lamele so bile v celoti uničene, drugi dve nemodificirani lameli pa sta bili zgolj malo ali pa nič poškodovani (vizualna ocena).



Slika 44: Velike poškodbe na modificirani lameli.

5.1.2 Modul elastičnosti

Podobno kot za upogibno trdnost smo tudi za modul elastičnosti skleпали, da bo odvisen od sestave lepljenca. Les po modifikaciji postane bolj krhek, zato smo pričakovali višji modul elastičnosti pri lepljencih, sestavljenih iz ene ali več modificiranih lamel, v primerjavi z lepljencem, ki je imel vse lamele nemodificirane (kontrolni lepljenec).



Slika 45: Povprečja modula elastičnosti.

Dobljeni rezultati so pokazali spremembe v obe smeri. Ugotovili smo, da termična modifikacija vpliva na modul elastičnosti, vendar bi morali za ustreznejše rezultate vsakemu lepljencu določiti modul elastičnosti pred modifikacijo in po njej.

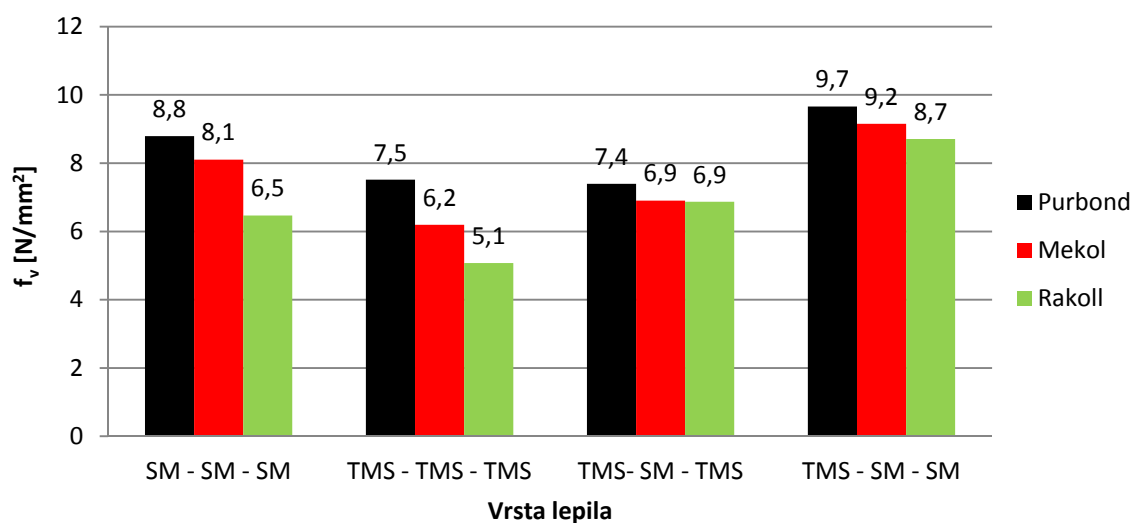
Pri lepljencu, ki je imel modificirane vse lamele, je bil modul elastičnosti višji kot pri kontrolnem. Povprečja modula elastičnosti kažejo razlike v velikosti okoli 500 N/mm^2 . Le pri lepilu Rakoll so bile pri modificiranem lepljencu vrednosti nekoliko višje, pri ostalih dveh lepilih pa je bila vrednost za omenjen lepljenec nižja kot pri kontrolnih preizkušancih.

Pri sestavi, ki je imela zunanji lameli modificirani, srednje pa ne, so rezultati (predvsem pri PVAc lepilih) v povprečju za 2000 N/mm^2 nižji kot pri kontrolnem preizkušancu. Takšne rezultate smo pričakovali za kontrolne lepljence, ki naj bi imeli najnižji modul, ker lamele niso modificirane, vendar pa je les heterogen material. Za natančnejše rezultate bi morali meritve izvajati pred in po modifikaciji ter nato komentirati razlike (za koliko se je modul elastičnosti povečal ali pa zmanjšal). Pri lepljencih sestave TMS – SM – TMS smo pričakovali rezultate, ki pa smo jih dobili pri preizkušancih z eno modificirano lamelo (TMS – SM – SM). Modul elastičnosti se je za to vrsto lepljencev gibal okoli 15000 N/mm^2 . Za boljšo primerjavo bi morali izdelati več preizkušancev, ker bi s tem dobili več rezultatov, na podlagi katerih bi lažje podali natančnejše sklepe.

5.1.3 Strižna trdnost

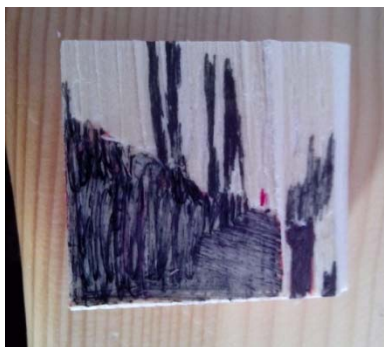
Strižna trdnost je bila merjena v skladu s standardom SIST EN 14080: 2013, ki narekuje, da mora biti strižna trdnost spojev vsaj 6 N/mm^2 , pri tem pa mora biti odstotek loma po lesu vsaj 90 %. Pri trdnosti 8 N/mm^2 je lahko lom po lesu najmanj 72 %, za trdnosti nad 11 N/mm^2 pa je dovolj 45 %.

Na sliki 46 lahko vidimo povprečja strižnih trdnosti lepilnih spojev. Najvišje strižne trdnosti so dosegli spoji lepljenca, ki je imel dve lameli nemodificirani eno pa modificirano. Rezultati preizkušancev, lepljenih z lepilom Rakoll, so bili konstantno nižji od ostalih. Pri analizi loma smo opazili, da je kar nekaj lomov segalo čez lepilni spoj. Na podlagi tega sklepamo, da pri stiskanju ni prišlo do dobre spojitve, ali pa je bil odprti čas predolg. Spoji z lepilom Mekol so bili nekoliko boljši, najvišje trdnosti pa so dosegli spoji s PUR lepilom. Pričakovali smo, da bodo najvišje vrednosti pri spojih v kontrolnih lepljenjih, saj naj bi bilo lepljenje termično modificiranega lesa zahtevnejše, vendar so se kot najboljši pokazali spoji med modificirano in nemodificirano lamelo.



Slika 46: Povprečja strižnih trdnosti.

2. lepilni spoji pri 1. kontrolnem lepljencu, zlepljenim z lepilom Rakoll GXL 4 Plus, so imeli zelo majhno strižno trdnost (Slika 27). Pri omenjenih spojih je bil odstotek loma po lesu majhen, kar je razvidno iz grafa na Sliki 28; lom je prikazan na Sliki 47. Menimo, da je bil odprti čas pri lepljenju teh preizkušancev predolg in je že prišlo do delne utrditve lepila ter tako po začetku delovanja tlaka ni bilo več možno dovolj dobro zlepit obeh lamel skupaj.



Slika 47: Obarvan lom po lepilu.

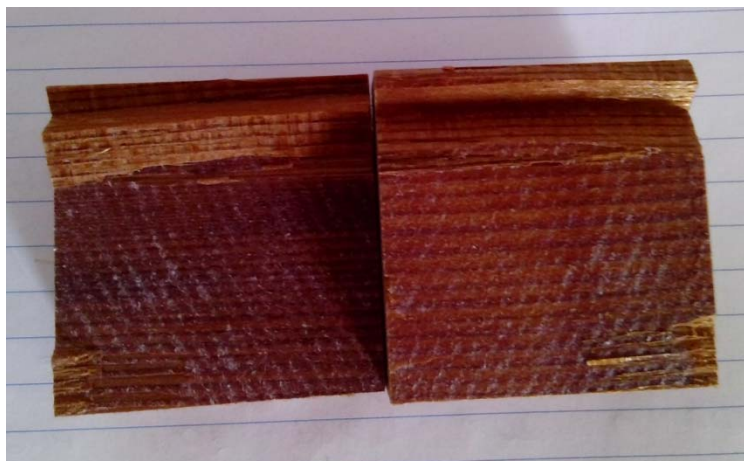
Podobno je bilo tudi pri spojih med modificiranimi lamelami (Slika 48), kjer se je pojavil tudi popoln lom po lepilnem spoju. Tega rezultata sicer iz grafov ne vidimo, ker gre za povprečja štirih preizkusov (vidni so v prilogi B). Kot razlog za takšen rezultat lahko zopet navedemo predolg odprti čas, čeprav smo upoštevali normative iz tehničnih listov, lahko pa se je zgodilo tudi to, da lamele niso bile enakih debelin.



Slika 48: Popoln lom po lepilnem spoju – delež loma po lesu je 0 %.

Pri sestavi TMS – TMS – TMS smo opazili pomanjkljivosti spojev 1 – 1 pri lepilu Mekol. Ostali rezultati so bili nad zahtevami standarda, še posebej pri lepilu Purbond, pri katerem je strižna trdnost znašala tudi do 10 N/mm^2 , pa tudi delež loma po lesu je bil nad 95 %.

Nekaj neustreznih rezultatov je bilo tudi pri kombinaciji TMS – SM – TMS, kjer je šlo za spoje med modificirano in nemodificirano lamelo. Do majhnih odstopanj je prišlo pri lepilu Purbond, ki velja za najbolj zanesljivo, kar potrjujejo tudi ostali rezultati.



Slika 49: Lom po spoju preizkušanca, zlepljenega z lepilom Purbond.

Rezultate, skladne s standardom, smo dobili pri lepljencu TMS – SM – SM. Vse vrednosti so se gibale okrog 9 N/mm^2 in tudi odstotek loma ni v nobenem primeru znašal manj kot 90 %. Tu smo lahko dobro primerjali strižne trdnosti spoja dveh nemodificiranih lamel in spoja modificirane ter nemodificirane lamele. Tako smo dokazali tudi, da je šlo pri kontrolnem preizkušancu za napako pri lepljenju in je tudi lepilo Rakoll GXL 4 Plus primerno za izdelavo spojev z visoko trdnostjo.

5.1.4 Skupna ocena

Glede na dobljene rezultate je bilo najboljše lepilo Purbond HB 440, saj je večina strižnih preizkušancev, zlepljenih s tem lepilom, zdržala obremenitve, ki jih zahteva standard. K temu je zagotovo pripomoglo dejstvo, da lepilo Purbond HB 440 lahko zapolni prazne prostore med lamelami, ki so morda nastali, če je bila kakšna lamela neravna ali pretanka. Kljub mogočim napakah na lamelah, je lepilo zlepilo lameli skupaj, pa tudi daljši odprti čas ni vplival na kakovost zlepljenosti. Večina lomov je potekala po lesu, tudi proč od neposredne bližine spoja (Slika 50), kar pomeni, da je bil lepilni spoj z vidika striga trdnejši od lesa.



Slika 50: Popoln lom po lesu – delež loma po lesu je 100 %.

Največji vpliv na višino upogibne trdnosti je imela vrsta lesa (modificiran ali pa nemodificiran), ne pa vrsta lepila, s katerim je bil zlepljen preizkušaneec. Paziti smo morali, da ni prišlo do zdrsa po lepilnem spoju, saj ne bi dobili natančnih rezultatov. Za vsako izmed uporabljenih lepil velja, da je primerno za izdelavo spojev visokih trdnosti. Da to preverimo, je potrebno izvesti različne preizkuse; le tako lahko natančneje ovrednotimo uporabljeno lepilo.

5.2 SKLEPI

Na osnovi rezultatov, pridobljenih v raziskavi, lahko podamo naslednje sklepe:

- Upogibna trdnost trislojnih lepljencev je odvisna predvsem od vrste lesa (nemodificiran ali modificiran) in smeri poteka lesnih vlaken, medtem ko vrsta uporabljenih lepil (PVAc ali PUR) na upogibno trdnost ni imela vpliva.
- Spremembe v strukturi lesa, ki nastanejo pri termični modifikaciji, zmanjšajo upogibno trdnost lesa tudi do 25 %. Zato je lepljen lameliran les, ki vsebuje termično modificirane lamele, primeren za elemente z manjšimi obremenitvami.
- Strižna trdnost nam poda vrednosti, na podlagi katerih lahko ovrednotimo posamezno lepilo. Poliuretansko lepilo je v povprečju zdržalo višje napetosti, saj bolje veže dva različna materiala in različne debeline lamel v primerjavi s PVAc lepili. PUR lepilo je zmožno bolje zapolniti prazne prostore med lamelami, lepilni spoj pa kljub večji debelini ostane precej trden.
- Ne glede na sestavo lepljenca smo pri oceni loma po lesu dobili visoke vrednosti. Večina je bila 100 %, imeli pa smo tudi nekaj primerov, kjer so bili rezultati nižji. Za te lahko rečemo, da je pri izdelavi preizkušancev prišlo do napak, kot so na primer neenakomerna debelina preizkušancev, predolg odprti čas ali pa predebel lepilni spoj.
- Lepljenec, ki ima eno zunanjo lamelo modificirano ostalih dveh pa ne, smo izbrali kot najprimernejšega. Pri izdelavi oken zaradi boljše odpornosti modificirano lamelo obrnemo na zunanjo stran, v notranjosti pa imamo navadno smrekovino, ki je svetlejša, kar je pri kupcih lesenih oken marsikdaj zaželeno zaradi lepšega izgleda.

Za proizvajalce oken je termično modificirana smrekovina velika priložnost, saj kupcem ponuja večjo kvaliteto in obstojnost od navadne smrekovine ter nižjo ceno od sibirskega macesna, ki predstavlja velik delež uporabe v proizvodnji lesenih oken. Priporočamo jo tudi za izdelavo polken, ki so močno izpostavljena vremenskim vplivom.

Termično modificiran les ima tudi nekaj pomanjkljivosti, saj ne zdrži tako velikih obremenitev kot pa nemodificiran les.

Vsa tri lepila, ki smo jih uporabili v raziskavi, so zanesljiva. Res je bilo največ odstopanj pri PVAc lepilih, vendar predstavlja v proizvodnji lepljenega lesa za stavbno pohištvo velik dejavnik tudi cena posameznega materiala (PVAc lepili sta cenejši od PUR lepila); prav tako pa tudi lepilni spoj pri oknih in vratih ni najbolj izpostavljen element celotnega izdelka. Za boljšo odpornost svetujemo uporabo PUR lepila, pri ustreznih konstrukcijski zaščiti pa lahko uporabimo tudi PVAc lepilo, ki je poleg tega, da je cenejše, tudi enostavnejše za uporabo.

6 POVZETEK

Termična modifikacija lesa je sodobna oblika izboljšanja obstojnosti lesa. Največji napredek je termično modificiran les dosegel v gradbeništvu, kjer je les že v osnovi pomemben predstavnik gradbenih materialov. Primeren je za fasade objektov, stavbno pohištvo (okna, vrata, polkna itd.), vrtno pohištvo, zunanje in notranje talne obloge, lažje konstrukcije in drugo. V primerjavi z macesnom ali hrastom je termično modificiran les cenejši in enako ali celo bolj obstojen. Prav tako je tudi estetski, saj s svojo svetlo rjavo barvo (smreka) poživi marsikateri objekt, v katerega je vgrajen.

V raziskavi smo izvajali preizkuse upogibne trdnosti trislojnega lameliranega lesa in strižne trdnosti lepilnih spojev, ki so bili lepljeni z dvema PVAc in enim PUR lepilom. Lepljenci so bili sestavljeni na štiri različne načine: prva oblika je imela vse tri lamele iz nemodificirane smrekovine, druga iz modificirane, pri tretji sta bili zunanji dve lameli modificirani srednja pa ne, četrta pa je imela eno zunanjo lamelo modificirano ostali dve pa ne.

Pri preizkusu upogibne trdnosti smo ugotovili, da lahko le-ta pri modificiranem lesu pade tudi za 25 %, kar omejuje uporabo termično modificiranega lesa pri konstrukcijah z velikimi obremenitvami. Višina upogibne trdnosti je bila predvsem odvisna od tega, ali je bil les modificiran ali ne, vrsta uporabljenega lepila pa na upogibno trdnost ni imela posebnega vpliva.

Pričakovali smo, da bo imel modificiran les višji modul elastičnosti kot pa nemodificiran. Polovica rezultatov je to domnevo potrdila, polovica pa ne. Za boljše in primerljivejše rezultate bi morali preizkušati lamelo pred in po modifikaciji.

Strižna trdnost je bila največja pri poliuretanskemu lepilu, čeprav je tudi pri ostalih dveh lepilih po večini ustrezala zahtevam standarda. Vzporedno smo opravljali tudi oceno loma po lesu, kjer smo imeli nekaj preizkušancev, ki jim je popustil lepilni spoj. Glede na to, da se je to pojavljalo pri istem lepljencu lahko rečemo, da je šlo za napako pri lepljenju in vzrok ni bil v lepilu.

Proizvajalcem konstrukcij pri lepljenju termično modificiranega lesa priporočamo uporabo poliuretanskega lepila, ki zadovolji tudi potrebe po odpornosti na vremenske vplive, kar je pomembno, če se konstrukcija uporablja na prostem. Treba pa je tudi predvideti, kakšnim obremenitvam bo tak les izpostavljen.

Uporabo enega izmed PVAc lepil pa svetujemo proizvajalcem oken in ostalega stavbnega pohištva, saj sta lepila dosegli zadovoljive rezultate ob nižji ceni lepila. Stavbno pohištvo iz modificirane smrekovine je dobro obstojno in estetsko, še posebej ga priporočamo za

izdelavo polken, ki veljajo za enega izmed najbolj izpostavljenih elementov stavbnega pohištva.

7 VIRI

- Brus R., 2012. Drevesne vrste na Slovenskem. 2. dopolnjena izdaja. Ljubljana, Založba Mladinska knjiga: 406 str.
- Humar M. 2016. Zaščita lesa. Gradivo za predavanja, Modifikacija lesa
- Kariž M., Šernek M. 2008. Lepljenje termično modificiranega lesa. Les, 60, 7–8: 275–282
- Kutnar A., Sandberg D. 2016. Thermally Modified Timber: Recent Developments In Europe and North America. Wood and Fiber Science, 48: 28–39
- M Sora. 2013. Informativno gradivo podjetja.
- Oddelek za lesarstvo 2015 <http://www.bf.uni-lj.si/lesarstvo/o-oddelku/predstavitev/prizidek/> (9. maj 2016)
- Parvis N., Sandberg D. 2012. Thermo-hydro-mechanical processing of wood. Lausanne, EPFL Press: 360 str.
- Rep G., Pohleven F. 2010. Komora za termično modifikacijo lesa z začetnim vakuumom. Les 62, 9: 413–414
- Silvaprodukt. 2016. Informativno gradivo podjetja.
- Silvaprodukt. 2016. Navodila za obdelavo in uporabo SilvaproWood. <http://www.silvaprodukt.si/data/file/Navodila-za-obdelavo-in-uporabo-SilvaproWood.pdf> (12. maj 2016)
- SIST EN 14080. Timberstructures – Glued laminated timber and glued solid timber – Requirements. 2013. 68–73
- SIST EN 408. Timberstructures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. 2010: 9-11; 31-33
- Šernek M., Bonstra M., Pizzi A., Despres A., Gerardin P. 2008. Bonding Performance of Heat Treated Wood With Structural Adhesives. Holz Roh Werkst, 66: 173–180
- Šernek M. 2011. Lamelirani lepljenci iz termično modificiranega lesa. V: Strokovni posvet Les iz preteklosti za prihodnost. Čar lesa, Cankarjev dom, Ljubljana, 13. maj 2011, Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 1-6

Tehnični list Mekol D3. 2005

Tehnični list Purbond HB 440. 2003

Tehnični list Rakoll GXL 4 Plus. 2004

ZAHVALA

Zahvaljujem se prof. dr. Milanu Šerneku za pomoč pri iskanju teme diplomskega dela in svetovanju tekom izdelave. Hvala tudi asistentu mag. Bogdanu Šegi za pomoč in svetovanje pri izvajanju preizkusov v laboratoriju. Hvala še recenzentu doc. dr. Mirku Karižu.

Zahvala gre tudi mojim staršem, ki so mi pomagali skozi celoten študij ter mi nudili finančno in moralno podporo. Zahvaljujem se bratoma za pomoč pri izdelavi preizkušancev za testiranja in pomoč pri pisanju diplomske naloge.

PRILOGE

Priloga A

Meritve upogibne trdnosti in modula elastičnosti

	F_1	F_2	E_m	t	b	F_{max}	f_m	t_{Test}
	N	N	N/mm ²	mm	mm	N	N/mm ²	s
TTT-P-1	1834	5706	11931,08	71,85	100,10	24992	62,39	138,68
TTT-P-2	2228	6922	14331,60	72,05	100,15	23791	59,03	175,34
TSS-P-2	2620	8130	16831,94	71,96	100,08	33313	82,73	180,98
TSS-P-1	2271	6964	14333,31	72,04	100,09	35043	87,03	169,60
SSS-P-2	1890	6059	12662,98	72,20	100,07	31862	78,79	167,26
SSS-P-1	2195	6862	14362,23	71,86	100,11	32607	81,37	208,08
TST-P-1	2272	7181	15079,65	71,90	100,14	29795	74,25	164,46
TST-P-2	1968	6106	12754,43	71,82	100,10	31343	78,31	199,96
TTT-M-1	2372	7683	16284,86	71,93	100,21	24980	62,15	112,26
TTT-M-2	1989	6096	12506,41	72,09	100,21	31046	76,90	200,68
TSS-M-1	2421	7415	15314,07	71,96	100,10	35583	88,56	178,32
TSS-M-2	2874	8755	18056,69	71,91	100,16	39630	98,71	144,18
SSS-M-2	2487	7606	15711,50	71,91	100,16	42864	106,76	191,60
SSS-M-1	2088	6571	13641,67	72,12	100,14	32742	81,09	148,04
TST-M-1	1952	5793	11648,35	72,24	100,17	21488	53,03	102,78
TST-M-2	2099	6466	13275,14	72,34	100,19	27285	67,51	121,26
TTT-R-1	2097	7072	15168,52	72,15	100,15	24694	61,10	97,32
TTT-R-2	2151	7061	14964,50	72,16	100,15	25039	61,94	98,82
TSS-R-1	2232	6698	13523,69	72,23	100,16	31522	77,82	187,52
TSS-R-2	2225	6902	14286,66	72,04	100,18	32181	79,85	150,64
SSS-R-1	2326	6922	14071,50	72,01	100,15	37022	91,96	311,74
SSS-R-2	2425	7506	15384,12	72,24	100,14	42832	105,73	261,96
TST-R-1	1726	5387	11029,85	72,39	100,12	29897	73,51	200,16
TST-R-2	1684	5301	11046,76	72,03	100,13	20329	50,48	151,00

Priloga B

Strižna trdnost lepilnih spojev

			t	b	F _{max}	f _v	w	t _{lom}	t _{obr}
			[mm]	[mm]	[N]	[N/mm ²]	[%]	[s]	[s]
1	R-SSS-1	1-1	48,93	48,34	18270	7,7	100	47	55
2		1-2	48,93	48,34	5	0,0		0	2
3		2-1	48,99	49,32	16880	7,0	10	20	20
4		2-2	48,99	48,32	6657	2,8	40	20	25
5		3-1	49,04	48,51	16766	7,0	40	31	32
6		3-2	49,04	48,51	7129	3,0	60	15	15
7		4-1	49,03	49,44	10427	4,3	80	20	27
8		4-2	49,03	49,44	8791	3,6	50	19	28
9	R-SSS-2	1-1	49,09	48,53	17973	7,5	100	28	37
10		1-2	49,09	48,53	21037	8,8	100	40	45
11		2-1	49,05	48,99	17944	7,4	100	30	30
12		2-2	49,05	48,99	25794	10,7	100	44	45
13		3-1	49,01	48,83	18561	7,7	100	37	45
14		3-2	49,01	48,83	19248	8,0	100	34	41
15		4-1	48,85	48,95	18743	7,8	100	38	38
16		4-2	48,85	48,95	24248	10,1	100	55	55
17	R-TSS-1	1-1	49,12	48,42	20688	8,7	100	33	33
18		1-2	49,12	48,42	20331	8,5	90	37	60
19		2-1	49,09	49,34	22029	9,1	100	35	47
20		2-2	49,09	49,34	22609	9,3	100	57	85
21		3-1	49,07	48,64	18526	7,7	100	29	29
22		3,2	49,07	48,64	20705	8,6	100	37	37
23		4-1	48,89	48,86	20593	8,6	100	34	34
24		4-2	48,89	48,86	22701	9,5	100	53	88
25	R-TSS-2	1-1	49,08	48,35	20886	8,8	100	38	38
26		1-2	49,08	48,35	22565	9,5	100	54	77
27		2-1	49,11	49,35	17905	7,4	100	29	29
28		2,2	49,11	49,35	21849	9,0	100	56	66
29		3-1	49,06	48,34	21275	8,9	100	44	54
30		3-2	49,06	48,34	19775	8,3	100	40	41
31		4-1	48,86	49,35	22982	9,5	100	45	45
32		4-2	48,86	49,35	19830	8,2	100	47	48
33	R-TTT	1-1	48,86	49,35	16835	6,9	100	29	30
34		1-2	48,86	49,35	17588	7,3	100	27	27
35		2-1	49,09	49,41	15090	6,2	100	26	26

36		2-2	49,09	49,41	19681	8,1	100	30	43
37		3-1	48,99	48,77	86	0,0		1	7
38		3-2	48,99	48,77	19719	8,2	100	29	30
39		4-1	49,10	49,19	14494	6,0	100	26	26
40		4-2	49,10	49,19	5716	2,4	100	16	25
41	R2-TTT	1-1	49,11	48,53	16967	7,1	100	26	26
42		1-2	49,11	48,53	1569	0,7	10	15	47
43		2-1	49,11	48,96	18403	7,6	100	31	31
44		2-2	49,11	48,96	4259	1,8	10	16	44
45		3-1	49,12	48,67	11312	4,7	100	22	23
46		3-2	49,12	48,67	3609	1,5	10	13	31
47		4-1	48,99	49,49	17879	7,3	100	31	31
48		4-2	48,99	49,49	13408	5,5	100	19	32
49	R1-TST	1-1	49,04	48,71	16373	6,8	100	27	27
50		1-2	49,04	48,71	19147	8,0	100	35	36
51		2-1	49,05	49,15	19453	8,0	100	33	33
52		2-2	49,05	49,15	2665	1,1	100	9	28
53		3-1	49,05	48,88	15546	6,5	100	25	25
54		3-2	49,05	48,88	20581	8,5	100	37	37
55		4-1	48,84	49,06	19457	8,1	100	41	41
56		4-2	48,84	49,06	4405	1,8	100	17	59
57	R2-TST	1-1	49,02	48,34	21630	9,1	100	40	49
58		1-2	49,02	48,34	17709	7,4	100	35	36
59		2-1	49,09	49,49	23564	9,7	100	48	48
60		2-2	49,09	49,49	9872	4,0	100	20	20
61		3-1	49,03	48,48	19500	8,2	100	35	35
62		3-2	49,03	48,48	20590	8,6	100	54	55
63		4-1	49,06	49,17	21992	9,1	100	47	47
64		4-2	49,06	49,17	12025	5,0	100	24	25
65	P1-SSS	1-1	49,02	48,58	19584	8,2	100	42	57
66		1-2	49,02	48,58	21115	8,8	100	58	72
67		2-1	49,17	48,92	20088	8,3	100	39	70
68		2-2	49,17	48,92	22831	9,5	100	59	92
69		3-1	48,91	48,68	17763	7,4	100	38	49
70		3-2	48,91	48,68	20639	8,6	100	52	65
71		4-1	48,98	49,00	21071	8,7	100	45	57
72		4-2	48,98	49,00	21017	8,7	100	52	61
73	P2-SSS	1-1	49,04	48,62	19660	8,2	100	38	38
74		1-2	49,04	48,62	24103	10,1	100	54	55
75		2-1	49,15	48,87	20406	8,5	100	36	44
76		2-2	49,15	48,87	26263	10,9	100	74	78
77		3-1	48,98	48,69	19305	8,1	100	32	40

78		3-2	48,98	48,69	22755	9,5	100	48	59
79		4-1	48,89	48,88	18946	7,9	100	31	54
80		4-2	48,89	48,88	22096	9,2	100	52	61
81	P1-TSS	1-1	49,02	48,63	22762	9,5	100	59	63
82		1-2	49,02	48,63	27394	11,4	100	63	66
83		2-1	49,05	49,06	24344	10,1	100	62	72
84		2-2	49,05	49,06	28120	11,6	100	82	84
85		3-1	48,99	48,72	23761	9,9	100	49	57
86		3-2	48,99	48,72	23958	10,0	100	40	75
87		4-1	48,95	48,87	21201	8,8	100	37	52
88		4-2	48,95	48,87	24508	10,2	100	68	105
89	P2-TSS	1-1	49,01	48,42	22827	9,6	100	38	39
90		1-2	49,01	48,42	20488	8,6	100	49	88
91		2-1	49,02	49,46	24400	10,0	100	48	48
92		2-2	49,02	49,46	22642	9,3	100	41	74
93		3-1	48,99	49,12	22891	9,5	100	41	68
94		3-2	48,99	49,12	19827	8,2	100	94	101
95		4-1	49,01	48,76	22879	9,5	100	40	40
96		4-2	49,01	48,76	19899	8,3	100	42	55
97	P1-TTT	1-1	48,99	48,95	19477	8,1	100	35	39
98		1-2	48,99	48,95	16892	7,0	100	30	35
99		2-1	49,00	49,09	20250	8,4	100	43	49
100		2-2	49,00	49,09	11160	4,6	30	37	39
101		3-1	49,00	48,97	16885	7,0	90	28	32
102		3-2	49,00	48,97	17398	7,2	100	31	31
103		4-1	49,09	48,92	18451	7,7	90	35	50
104		4-2	49,09	48,92	16416	6,8	60	27	27
105	P2-TTT	1-1	48,99	49,01	21650	9,0	100	36	38
106		1-2	48,99	49,01	22296	9,2	100	29	29
107		2-1	49,08	48,95	20158	8,4	100	31	40
108		2-2	49,08	48,95	20404	8,5	100	34	44
109		3-1	49,07	49,19	18699	7,7	100	25	26
110		3-2	49,07	49,19	14697	6,1	100	19	19
111		4-1	49,05	48,87	17372	7,2	100	37	43
112		4-2	49,05	48,87	17887	7,4	100	39	43
113	P1-TST	1-1	49,04	48,69	25648	10,7	100	40	43
114		1-2	49,04	48,69	22296	9,3	100	41	42
115		2-1	49,02	48,97	23711	9,8	100	41	53
116		2-2	49,02	48,97	17335	7,2	100	39	48
117		3-1	49,05	48,77	23536	9,8	100	64	65
118		3-2	49,05	48,77	6348	2,6	100	22	67
119		4-1	49,06	49,02	26052	10,8	100	59	59

120		4-2	49,06	49,02	7840	3,2	100	24	37
121	P2-TST	1-1	49,17	48,49	19777	8,3	100	38	38
122		1-2	49,17	48,49	10315	4,3	100	22	28
123		2-1	49,20	49,55	19221	7,9	100	33	33
124		2-2	49,20	49,55	20430	8,4	100	36	36
125		3-1	49,11	48,75	20615	8,6	100	41	41
126		3-2	49,11	48,75	5493	2,3	100	14	39
127		4-1	49,05	49,11	20522	8,5	100	38	38
128		4-2	49,05	49,11	16058	6,6	100	26	32
129	M1-SSS	1-1	49,14	48,81	21412	8,9	100	30	30
130		1-2	49,14	48,81	20432	8,5	100	35	35
131		2-1	49,08	48,71	18445	7,7	100	39	39
132		2-2	49,08	48,71	23168	9,7	100	44	51
133		3-1	49,18	48,71	23132	9,6	100	33	34
134		3-2	49,18	48,71	22210	9,2	100	29	29
135		4-1	49,28	48,48	19948	8,3	100	47	62
136		4-2	49,28	48,48	22931	9,6	100	39	39
137	M2-SSS	1-1	49,10	48,56	22516	9,4	100	46	55
138		1-2	49,10	48,56	11328	4,7	100	21	29
139		2-1	49,04	49,02	20605	8,5	100	34	48
140		2-2	49,04	49,02	18186	7,5	100	28	29
141		3-1	49,32	48,91	21269	8,8	100	40	49
142		3-2	49,32	48,91	12992	5,4	100	23	32
143		4-1	49,03	49,07	18744	7,8	100	38	57
144		4-2	49,03	49,07	14733	6,1	100	21	24
145	M1-TSS	1-1	49,03	48,55	23612	9,9	100	32	37
146		1-2	49,03	48,55	19948	8,3	100	28	28
147		2-1	48,96	48,93	23738	9,9	100	32	32
148		2-2	48,96	48,93	26320	10,9	100	40	53
149		3-1	48,90	49,01	22966	9,5	100	32	34
150		3-2	48,90	49,01	14743	6,1	100	20	21
151		4-1	48,80	48,69	18597	7,8	100	29	29
152		4-2	48,80	48,69	25135	10,5	100	45	46
153	M2-TSS	1-1	49,19	48,57	24798	10,3	100	33	33
154		1-2	49,19	48,57	20386	8,5	100	28	29
155		2-1	49,19	49,62	25202	10,3	100	35	35
156		2-2	49,19	49,62	21658	8,8	100	34	34
157		3-1	48,73	49,24	22690	9,4	100	34	42
158		3-2	48,73	49,24	19699	8,2	60	31	31
159		4-1	49,09	49,61	24439	10,0	100	36	36
160		4-2	49,09	49,61	19610	8,0	100	36	36
161	M1-TTT	1-1	48,88	48,95	10537	4,4	100	23	28

162		1-2	48,88	48,95	15584	6,5	100	21	21
163		2-1	48,91	49,30	6665	2,8	100	19	25
164		2-2	48,91	49,30	11145	4,6	100	17	17
165		3-1	48,90	49,54	9046	3,7	100	20	20
166		3-2	48,90	49,54	14211	5,8	100	20	22
167		4-1	48,87	49,02	12645	5,3	100	25	29
168		4-2	48,87	49,02	11012	4,6	100	18	21
169	M2-TTT	1-1	49,28	48,95	15976	6,6	100	24	33
170		1-2	49,28	48,95	19323	8,0	100	36	36
171		2-1	49,30	48,45	20714	8,6	100	35	35
172		2,2	49,30	48,45	18298	7,6	100	28	29
173		3-1	49,28	49,18	14568	6,0	100	23	23
174		3-2	49,28	49,18	19188	7,9	100	41	41
175		4-1	49,34	49,02	20651	8,5	100	35	40
176		4-2	49,34	49,02	19978	8,2	100	33	33
177	M1-TST	1-1	48,93	48,90	17670	7,4	100	31	31
178		1-2	48,93	48,90	19667	8,2	100	51	70
179		2-1	48,91	48,88	19413	8,1	100	33	33
180		2-2	48,91	48,88	16461	6,9	100	28	33
181		3-1	48,94	49,12	17265	7,1	100	35	35
182		3-2	48,94	49,12	18459	7,6	100	46	47
183		4-1	49,05	48,74	14120	5,9	100	29	29
184		4-2	49,05	48,74	17859	7,4	100	43	48
185	M2-TST	1-1	49,18	49,28	15685	6,4	100	30	43
186		1-2	49,18	49,28	17189	7,1	100	23	34
187		2-1	49,20	48,46	15119	6,3	100	27	34
188		2-2	49,20	48,46	20125	8,4	100	29	30
189		3-1	49,16	49,16	9928	4,1	80	22	22
190		3-2	49,16	49,16	18842	7,8	100	30	36
191		4-1	49,17	48,27	11670	4,9	100	29	32
192		4-2	49,17	48,27	16499	6,9	100	47	48