

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Jure Žigon

**PRIMERJAVA STRIŽNE TRDNOSTI LINEARNO VARJENEGA
SPOJA BUKOVINE IN UREA-FORMALDEHIDNEGA LEPILNEGA
SPOJA**

MAGISTRSKA NALOGA
Magistrski študij – 2. stopnja

**COMPARISON OF SHEAR STRENGTH OF LINEAR WELDED
BEECH WOOD AND UREA-FORMALDEHYDE ADHESIVE BOND**

M. Sc. THESIS
Master Study programmes

Ljubljana, 2014

Magistrska naloga je zaključek magistrskega študija lesarstva – 2. stopnja. Postopek termične modifikacije lesa je bil opravljen v podjetju Silvaproduct d.o.o., postopek linearnega varjenja lesa pa v laboratorijih inštituta École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois (Enstib), Université de Lorraine, v Franciji. Izdelava in testiranja preizkušancev so bila opravljena na Oddelku za lesarstvo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, v laboratorijih Katedre za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin.

Senat Oddelka za lesarstvo je dne 16. 1. 2014 odobril naslov magistrske naloge in za mentorja imenoval prof. dr. Milana Šerneka, za somentorja prof. dr. Antonia Pizzija, za recenzenta pa prof. dr. Franca Pohlevna.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Magistrska naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela. Podpisani Žigon Jure se strinjam z objavo svoje magistrske naloge na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je projekt, ki sem ga oddal v elektronski obliki, identičen tiskani verziji.

Jure Žigon

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Du2
DK	UDK 630*824:812.7
KG	lepilni spoj/kemična modifikacija/strižna trdnost/termična modifikacija/urea-formaldehidno lepilo/varjenje lesa
AV	ŽIGON, Jure
SA	ŠERNEK, Milan (mentor)/PIZZI, Antonio (somentor)/POHLEVEN, Franc (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2014
IN	PRIMERJAVA STRIŽNE TRDNOSTI LINEARNO VARJENEGA SPOJA BUKOVINE IN UREA-FORMALDEHIDNEGA LEPILNEGA SPOJA
TD	Magistrska naloga (Magistrski študij – 2. stopnja)
OP	X, 52 str., 9 pregl., 32 sl., 3 pril., 53 vir.
IJ	sl
Jl	sl/en
AI	Les je naravni material, ki ga uporabljamo za izdelavo različnih izdelkov, tako v notranjih kot zunanjih prostorih. Varjenje lesa predstavlja tehniko spajanja lesa, brez uporabe lepil. Največja pomanjkljivost tako spojenega lesa je neodpornost spojev na povišano vlažnost. To lastnost smo poskusili izboljšati s termično in kemično modifikacijo bukovine pred varjenjem, pri čemer smo les tretirali z raztopino borove, citronske in očetne kisline. Za primerjavo smo nekaj vzorcev lesa zlepili tudi z urea-formaldehidnim lepilom, ki je namenjeno za lepljenje izdelkov za uporabo v suhih pogojih. Vzorce spojenega lesa smo pripravili v skladu s standardom SIST EN 12765. Ugotovili smo, da vnos različnih raztopin kislin v les ni izboljšal trdnosti varjenih spojev in njihove odpornosti na povišano vlažnost. Med uporabljenimi kislinami sta se v suhih pogojih najbolje izkazali citronska in očetna kislina. Zvarjen naravni in termično modificiran bukov les ima določeno strižno trdnost (6,6 oz. 9,1 N/mm ²), ki pa je nižja od strižne trdnosti spoja pri lepljeni naravni in termično modificirani bukovini z urea-formaldehidnim lepilom (14,3 oz. 11,9 N/mm ²).

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Du2
DC UDC 630*824:812.7
CX adhesive bond/shear strength/chemical modification/thermal modification/urea-formaldehyde adhesive/wood welding
AU ŽIGON, Jure
AA ŠERNEK, Milan (supervisor)/PIZZI, Antonio (co-supervisor)/POHLEVEN, Franc (reviewer)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY 2014
TI COMPARISON OF SHEAR STRENGTH OF LINEARLY WELDED BEECH WOOD AND UREA-FORMALDEHYDE ADHESIVE BOND
DT M. Sc. Thesis
NO X, 52 p., 9 tab., 32 fig., 3 ann., 53 ref.
LA sl
AL sl/en
AB Wood is a natural material to manufacture a variety of products, for internal and external usage. Welding of wood is a technique for joining wood without use of any synthetic adhesive. The main imperfection of such wood is its low resistance to higher humidity. We tried to improve this property with thermal and chemical modification of welded beech wood, with solutions of boric, citric and acetic acid added. For comparison, several samples of wood were bonded using urea-formaldehyde adhesive quite often used to manufacture products for dry conditions. Samples of such wood were then prepared in accordance to standard SIST EN 12765. Among the acids used for dry conditions, citric and acetic acid showed the best results. Welded natural and heat treated beech wood had a certain strength (6.6 or 9.1 N/mm²), lower than shear strength of bonded natural and thermally modified beech wood with urea-formaldehyde adhesive (14.3 or 11.9 N/mm²).

KAZALO VSEBINE

	str.
Ključna informacijska dokumentacija (KDI)	III
Key words documentation (KWD)	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic	VII
Kazalo slik	VIII
Kazalo prilog	X
1 UVOD.....	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2 CILJ RAZISKOVANJA	2
1.3 DELOVNE HIPOTEZE	2
2 PREGLED OBJAV.....	3
2.1 MODIFIKACIJA LESA	3
2.1.1 Termična modifikacija lesa	3
2.1.2 Kemična modifikacija lesa	4
2.1.2.1 Uporaba borove kisline za modifikacijo lesa	5
2.1.2.2 Uporaba citronske kisline za modifikacijo lesa	6
2.1.2.3 Uporaba očetne kisline za modifikacijo lesa	6
2.2 VARJENJE LESA	7
2.2.1 Linearno torni varjenje lesa	7
2.2.1.1 Vpliv vlažnosti lesa na lastnosti varjenega spoja	9
2.2.1.2 Varjenje modificiranega lesa	11
2.3 UREA-FORMALDEHIDNO LEPILO	12
2.3.1 Lepljenje TM lesa z UF lepilom	12
2.4 UVRŠČANJE SPOJENEGA LESA V TRAJNOSTNE RAZREDE	13
3 MATERIAL IN METODE	16
3.1 MATERIAL	16
3.1.1 Les	16
3.1.2 Raztopine kislin	16
3.1.3 Urea-formaldehidno lepilo	16
3.1.4 Lamele za izdelavo preizkušancev zlepljenih z UF lepilom	16
3.2 METODE	17
3.2.1 Termična modifikacija lesa	18
3.2.2 Priprava lesa	19
3.2.3 Tretiranje površine lesa z raztopinami kislin	19
3.2.4 Impregnacija lesa z raztopino citronske kisline	20
3.2.5 Varjenje lesa	21
3.2.6 Merjenje gostotnih profilov varjenega lesa	22
3.2.7 Lepljenje lesa z UF lepilom	23
3.2.8 Priprava preizkušancev za ugotavljanje strižne trdnosti spojev	23
3.2.8.1 Priprava preizkušancev v skladu s 1. načinom priprave	24
3.2.8.2 Priprava preizkušancev v skladu s 2. načinom priprave	24
3.2.8.3 Priprava preizkušancev v skladu s 3. načinom priprave	25

3.2.8.4	Priprava preizkušancev v skladu s 4. načinom priprave	25
3.2.9	Ugotavljanje strižne trdnosti lepilnih spojev	25
4	REZULTATI IN RAZPRAVA	27
4.1	PORAZDELITVE GOSTOTE VARJENIH VZORCEV	27
4.1.1	Gostotna profila varjenega netretiranega lesa	27
4.1.2	Gostotna profila varjenega lesa, tretiranega z 10 % raztopino borove kisline	27
4.1.3	Gostotna profila varjenega lesa, tretiranega z 10 % raztopino citronske kisline	28
4.1.4	Gostotna profila varjenega lesa, tretiranega z 10 % raztopino očetne kisline	28
4.1.5	Gostotna profila varjenega lesa, vakuumsko impregniranega z 10 % raztopino citronske kisline	29
4.1.6	Gostotna profila varjenega lesa, s povišano ravnovesno vlažnostjo	29
4.1.7	Gostotna profila varjenega TM lesa, obdelanega z 20 % raztopino citronske kisline	30
4.2	SPREMLJANJE TEMPERATURE V UF LEPILNEM SPOJU	31
4.3	STRIŽNA TRDNOST SPOJEV	32
4.3.1	Strižna trdnost spojev pripravljenih po 1. načinu priprave	32
4.3.2	Strižna trdnost spojev pripravljenih po 2. načinu priprave	33
4.3.3	Strižna trdnost spojev pripravljenih po 3. načinu priprave	36
4.3.4	Strižna trdnost spojev pripravljenih po 4. načinu priprave	38
5	RAZPRAVA IN SKLEPI	40
5.1	RAZPRAVA	40
5.1.1	Primerjava strižne trdnosti varjenih preizkušancev iz naravne in TM bukovine	43
5.1.2	Primerjava strižne trdnosti varjenih in zlepljenih preizkušancev	44
5.2	SKLEPI	45
6	POVZETEK	47
7	VIRI.....	49

ZAHVALA

PRILOGE

KAZALO PREGLEDNIC

str.

Preglednica 1: Področja uporabe in klimatski ogoji glede na trajnosti razred duromernih .. lepil za lepljenje lesa za nekonstrukcijsko uporabo	13
Preglednica 2: Način priprave vzorcev za razvrščanje duromernih lepil za lepljenje lesa za nekonstrukcijsko uporabo v trajnostne razrede	14
Preglednica 3: Razdelitev načrtovanega dela z vzorci, obravnavanimi v raziskovalnem delu	18
Preglednica 4: Nastavljeni parametri pri varjenju lesa	22
Preglednica 5: Strižna trdnost spoja in delež loma po lesu za preizkušance testirane po 1. načinu priprave	32
Preglednica 6: Strižna trdnost spoja in delež loma po lesu za preizkušance testirane po 2. načinu priprave	34
Preglednica 7: Strižna trdnost spoja in delež loma po lesu za preizkušance testirane po 3. načinu priprave	37
Preglednica 8: Primerjava izmerjenih strižnih trdnosti preizkušancev iz naravne in TM bukovine	42
Preglednica 9: Primerjava strižnih trdnosti varjenih preizkušancev in preizkušancev zlepljenih z UF lepilom	44

KAZALO SLIK

str.

Slika 1: Skica spajanja lesa z uporabo tehnike linearnega tornega varjenja.....	8
Slika 2: Skica preizkušanca za ugotavljanje strižne trdnosti lepilnih spojev.....	15
Slika 3: Komora za vakuumsko modifikacijo lesa v podjetju Silvaprodukt d.o.o.....	18
Slika 4: Nanašanje raztopin na površino vzorcev	19
Slika 5: Vakuumska impregnacija vzorcev z raztopinami kislin.....	20
Slika 6: Naprava za linearno torni varjenje lesa KLN Ultraschall LVW-2261	21
Slika 7: Vzorca lesa, vpeta v čeljusti stroja za varjenje lesa.....	21
Slika 8: Naprava za merjenje gostotnih profilov z X – žarki GreCon DAX 5000	22
Slika 9: Pripravljeni vzorci za merjenje gostotnih profilov	23
Slika 10: Izdelani preizkušanci za ugotavljanje natezno strižne trdnosti	24
Slika 11: Vzorci potopljene v kad napolnjeno z vodo.....	25
Slika 12: Preizkušanje strižne trdnosti lepilnih in zvarjenih spojev na univerzalnem testirnem stroju ZWICK/Z005	26
Slika 13: Gostotna profila vzorcev varjene naravne in TM bukovine	27
Slika 14: Gostotna profila vzorcev varjene naravne in TM bukovine, tretirane z 10 % raztopino borove kisline	28
Slika 15: Gostotna profila vzorcev varjene naravne in TM bukovine, tretirane z 10 % raztopino citronske kisline.....	28
Slika 16: Gostotna profila vzorcev varjene naravne in TM bukovine, tretirane z 10 % raztopino očetne kisline.....	29
Slika 17: Gostotna profila vzorcev varjene naravne in TM bukovine, vakuumsko impregnirane z 10 % raztopino citronske kisline	29
Slika 18: Gostotni profil vzorca varjene naravne in TM bukovine, s povišano ravnovesno vlažnostjo.....	30
Slika 19: Gostotna profila vzorcev varjene TM bukovine, tretirane oz. vakuumsko impregnirane z 20 % raztopino citronske kisline	30
Slika 20: Diagram temperature v UF lepilnem spoju med lepljenjem v stiskalnici	31
Slika 21: Strižna trdnost spoja in delež loma po lesu preizkušancev iz naravne bukovine po 1. načinu priprave	33
Slika 22: Strižna trdnost spoja in delež loma po lesu preizkušancev iz TM bukovine po 1. načinu priprave	33
Slika 23: Strižna trdnost spoja in delež loma po lesu preizkušancev iz naravne bukovine po 2. načinu priprave	35
Slika 24: Strižna trdnost spoja in delež loma po lesu preizkušancev iz TM bukovine po 2. načinu priprave	35
Slika 25: Izgled zvarjenega spoja po 24 urnem namakanju v hladni vodi (Označeno je suho območje spoja)	36
Slika 26: Strižna trdnost spoja in delež loma po lesu preizkušancev iz naravne bukovine po 3. načinu priprave	37
Slika 27: Strižna trdnost spoja in delež loma po lesu preizkušancev iz TM bukovine po 3. načinu priprave	38
Slika 28: Izgled zvarjenih spojev po 3 urnem kuhanju v vreli vodi in 2 urnem namakanju v hladni vodi.....	39

Slika 29: Primerjava strižne trdnosti preizkušancev iz naravne bukovine, po posameznem načinu priprave	42
Slika 30: Primerjava strižne trdnosti preizkušancev iz TM bukovine, po posameznem načinu priprave.....	43
Slika 31: Primerjava strižne trdnosti preizkušancev iz varjene netretirane naravne in TM bukovine, po posameznem načinu priprave	44
Slika 32: Primerjava strižne trdnosti varjenih preizkušancev in preizkušancev zlepljenih z UF lepilom, po posameznem načinu priprave	45

KAZALO PRILOG

- Priloga A: Podatki meritev in statistika strižnih trdnosti spojev ter deleža loma po lesu preizkušancev po 1. načinu priprave
- Priloga B: Podatki meritev in statistika strižnih trdnosti spojev ter deleža loma po lesu preizkušancev po 2. načinu priprave
- Priloga C: Podatki meritev in statistika strižnih trdnosti spojev ter deleža loma po lesu preizkušancev po 3. načinu priprave

1 UVOD

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Les lahko spojimo na različne načine. Za spajanje lesa lahko uporabimo razna naravna ali sintetična lepila. Posamezne dele lesenih izdelkov pa lahko povežemo tudi z uporabo ostalih veznih elementov, kot so vijaki in žebli. Oba načina povezovanja lesa pa imata določene pomanjkljivosti. Kovinski elementi so po navadi izpostavljeni raznim korozijam, sodobna sintetična lepila pa veljajo za okolju neprijazna. Alternativa takšnim načinom spajanja lesa je lahko varjenje lesa.

Varjenje masivnega lesa je sodobni način spajanja, brez uporabe sintetičnih lepil in sredstev za spajanje. Varjenje lesa je iz okoljevarstvenega vidika bolj zaželeno, kot lepljenje s sintetičnimi lepili. Vendar pa so pri varjenem spoju prisotne nekatere pomanjkljivosti. Ustrezno zvarjeni spoj je po trdnosti lahko primerljiv lepilnemu spoju nekaterih lepil za uporabo v notranjih, suhih prostorih kot npr. spoji zlepljeni z urea-formaldehidnim (UF) lepilom. Varjenje lesa predstavlja hiter način formiranja spojev, ki so takoj primerni za nadaljnjo obdelavo, kar je prednost v primerjavi z lepili, kjer je nadaljnja obdelava lesa možna šele po nekaj urah.

Za proizvodnjo izdelkov za uporabo v suhih prostorih pogosto uporabljamo UF lepilo in bukovino. Bukov les je uporaben za številne izdelke. Njegovo trajnost in dimenzijsko stabilnost pa lahko med drugim izboljšamo s postopkom termične modifikacije.

Za uporabo lesenih izdelkov v zunanjih pogojih je potrebno les zaščititi ali termično oz. kemično modificirati. Termična modifikacija je okolju prijazen postopek toplotne obdelave lesa, pri katerem se les v posebni komori izpostavi visoki temperaturi ob odstotnosti kisika. Z modifikacijo se spremeni struktura lesa in s tem izboljša njegova dimenzijska stabilnost, trajnost, ter odpornost na lesne škodljivce.

Pri različnih načinih spajanja lesa lahko uporabimo tudi različne naravne kisline, bodisi z namenom povečanja odpornosti lesa proti povišani vlažnosti ali povečanja trdnosti lepilnih spojev. Področje varjenja termično in kemično modificiranega lesa je za zdaj manj raziskano in je vredno poglobljene znanstvene obravnave.

1.2 CILJ RAZISKOVANJA

V raziskavi bomo uporabili termično modificirano in nemodificirano bukovino, ki jo bomo spojili s postopkom linearnega tornega varjenja in z uporabo UF lepila. Vlažnost vzorcev bo enaka ravnovesni vlažnosti, ki jo les doseže v standardnih klimatskih pogojih in pogojih s povišano relativno zračno vlažnostjo. Določene vzorce, ki jih bomo zvarili, bomo predhodno dodatno tretirali z raztopinami različnih kislin; pri tem bomo uporabili raztopino borove, citronske in očetne kisline.

Iz spojenega lesa bomo izdelali preizkušance v skladu s standardom SIST EN 205, njihove lastnosti pa preverili v skladu s standardom SIST EN 12765, s čimer bomo proučili vpliv povišane vlažnosti na trdnost spojev. Zvarjene in zlepljene vzorce lesa bomo tako pripravili v skladu s štirimi različnimi načini priprave in destruktivno ugotovili trdnost formiranih spojev.

Z raziskavo želimo razviti postopek spajanja naravnega in termično modificiranega bukovnega lesa brez uporabe sintetičnih lepil. Poskušamo najti način spajanja lesa, pri katerem ne uporabljamo sintetičnih snovi, temveč spojine, ki so prisotne v naravi. S tretiranjem kontaktnih površin z različnimi raztopinami kislin želimo izboljšati vlagoodpornost in trdnost spojev linearno torni varjenega lesa.

1.3 DELOVNE HIPOTEZE

Predpostavljamo, da so zvarjeni spoji lesa po trdnosti primerljivi z običajnimi lepilnimi spoji. Vpliv povišane relativne zračne vlažnosti na obnašanje zvarjenega lesa bi zmanjšali s termično modifikacijo lesa in vnosom kisline v območje spoja dveh kosov lesa. Uporaba raztopin določenih kislin bi prispevala tudi k povečanju trdnosti formiranih spojev.

2 PREGLED OBJAV

2.1 MODIFIKACIJA LESA

2.1.1 Termična modifikacija lesa

Postopek uporabe toplote, kot sredstva za izboljšanje lastnosti lesa, ni nov in se je začel širše pojavljati že v začetku 20. stoletja. Do danes je bilo razvitih pet različnih širše uporabljenih postopkov termične tretacije lesa (Thermowood, Plato, OHT-Oil heat Treatment, Bois Perdure in Retification), pojavili pa so se tudi nekateri drugi (Esteves in Pereira, 2009).

V Sloveniji je bil razvit postopek modifikacije lesa v intaktnem vakuumu (Pohleven in Rep, 2004; Rep. in sod., 2004; Rep. in sod., 2010), ki se tudi že komercialno uporablja. V tem primeru se pred fazo segrevanja v komori vzpostavi podtlak s katerim odstranimo kisik, katerega nadomestijo hlapni produkti iz lesa. Med procesom modifikacije kemijske spremembe v lesu nastanejo hitreje, zaradi izhajanja hlapnih produktov pa tlak v komori ponovno naraste, kar nadalje omogoča segrevanje s toplotno konvekcijo (Pohleven in Rep, 2004; Rep in Pohleven, 2009). Raziskave so pokazale, da ima les obdelan s to tehniko modifikacije lastnosti primerljive z lesom, ki je obdelan z drugimi postopki termične modifikacije (Šernek in sod., 2007).

Glavna razlika med vsemi postopki termične modifikacije lesa je v uporabljenem načinu oz. mediju za segretje lesa. Uporabljeni medij prepreči prisotnost kisika med postopkom in s tem pojav pirolize lesa (Pohleven in Rep, 2004).

Izpostavitvev lesa povišani temperaturi (170 do 220 °C), ob odsotnosti atmosferskega zraka, privede do pojava sprememb v njegovi strukturi in kemijski sestavi. Odvisno od vrste uporabljenega lesa, trajanja in drastičnosti postopka termične obdelave, tako obdelan les nakazuje povečano odpornost proti lesnim škodljivcem in vplivom klimatskih pogojev. Poveča se tudi njegova dimenzijska stabilnost, prihaja do sprememb v barvi lesa poslabšajo pa se nekatere mehanske lastnosti (Esteves in Pereira, 2009; Rep in sod., 2010).

Eden od najboljših pokazateljev učinkovitosti in kvalitete termične modifikacije je izguba mase lesa, ki se giblje med 2 in 12 %, ter je seveda odvisna od pogojev pri modifikaciji (Hill, 2006; Esteves in Pereira, 2009).

Analize sprememb v mikrostrukturi lesa bukovine po termični obdelavi so pokazale, da je v lesu prišlo tudi do kolapsa celic, deformacij v libriformskih vlaknih, radialnih razpok v bližini trakov in razpok v celični steni (Esteves in Pereira, 2009).

Znižana ravnovesna vlažnost lesa je glavna posledica njegove termične obdelave. Do zmanjšanja absorpcije vode pride po izpostavitvi lesa nad temperaturo 100 °C (Kollmann in Schneider, 1963). Ravnovesna vlažnost lesa se v primeru bukovine, po postopku termične modifikacije, pri normalnih klimatskih pogojih (65 % relativna zračna vlažnost, 20 °C) zmanjša iz prvotnih 10 na 5 % (Kamdern in sod., 2002). Celične stene tako absorbirajo manj vlage iz okolice, kar je posledica kemijskih sprememb v smislu zmanjšanja hidroksilnih skupin. Hidroksilne skupine celuloze, zaradi povečanega deleža kristaliničnosti, nase vežejo manj molekul vode, vezavo le-teh pa dodatno prepreči premreženje lignina (Esteves in Pereira, 2009).

Zaradi povišane temperature pride do sprememb v kemijski sestavi celične stene. Nižji pH takšnega lesa je posledica cepitve acetilnih skupin v očetno kislino. V primeru termično modificirane bukovine pride do razpadanja hemiceluloz na posamezne sladkorne enote. Številne spremembe pa se zgodijo tudi v sestavi lignina (razpad določenih kemijskih vezi) (Hill, 2006; Windeisen in sod., 2007).

Največja slabost, ki se pojavi po termični modifikaciji lesa, je poslabšanje mehanskih lastnosti. Vpliv na modul elastičnosti je sicer manjši, medtem ko vrednosti statične in dinamične upogibne, natezne in strižne trdnosti močno upadejo. Zaradi razgradnje amorfnih polisaharidov les postane krhek. Zmanjša se tudi gostota lesa; v primeru bukovine za dobrih 18 %, glede na nemodificiran les, kar raziskovalci pripisujejo razgradnji hemiceluloz v hlapne produkte in izločitvi ekstraktivov (Boonstra in sod., 2007).

V splošnem velja, da z naraščanjem temperature in časa tretiranja lesa postaja temnejša. Spremembe v barvi in temnejši toni lesa so posledica pojava degradacijskih produktov hemiceluloz, sprememb v zvezi z ekstraktivi in nastajanja oksidacijskih produktov. Značilen vonj termično modificiranega lesa je posledica tvorbe furfurala med tretiranjem (Esteves in Pereira, 2009).

2.1.2 Kemična modifikacija lesa

Les lahko kemično modificiramo z namenom zmanjšanja adsorpcije vlage, krčenja, nabrekanja, kot tudi nagnjenosti k foto-degradaciji in biološkega razkroja (Miklečić in

sod., 2011). V splošnem je zmanjšanje dimenzijskih sprememb lesa zaradi kemične modifikacije, posledica vezave kemikalij v celice lesa (Obataya, 2005). Kemična modifikacija lesa je reakcija kemijskih reagentov s hidroksilnimi skupinami osnovnih kemijskih komponent lesa (Šefc in sod., 2012).

Opravljenе so bile raziskave, kjer so z namenom zmanjšanja adsorpcije vlage v les le tega kemično modificirali z uporabo različnih kislin in njihovih raztopin. Z vnašanjem različnih snovi v les so poskušali izboljšati tudi aktivacijo njegove površine ter sposobnosti za lepljenje in ugotoviti, ali dodatek teh snovi na lepilno površino izboljša kakovost lepilnih spojev. Po drugi strani pa nekateri avtorji opažajo znižanje trdnosti lesa po modifikaciji le-tega s kislinami, kar je posledica delne degradacije celične stene (Hill, 2006).

2.1.2.1 Uporaba borove kisline za modifikacijo lesa

Borova kislina je šibka kislina bora. Pri sobni temperaturi je v obliki belih ali brezbarvnih kristalov, ki so topni v vodi. V naravi jo najdemo kot sestavino mineralov, prisotna pa je tudi v morski vodi in skoraj vseh vrstah sadja.

Izboljšanja pri lepljenju so dosegli z nanašanjem borove kisline in njegovih spojin na površino lesa (Suezone, 1979). Zanj je sicer značilna slabša topnost v vodi (Humar in sod., 2011). Pri testiranju preizkušancev se je povečala adhezivnost med lesom in uporabljenim lepilom delež loma po lesu. K izboljšanju kakovosti zlepljenosti je največ prispevala uporaba 10 % raztopine bora; pri lepljenju so med drugim uporabili urea-formaldehidno (UF) lepilo. Dodatek bora v samo lepilno mešanico sicer ne vpliva na mehanske lastnosti utrjenega spoja (Humar in sod., 2011), prisotnost bora v lesu ima zaviralni učinek na razvoj gliv razkrojevalk in na zmanjšano gorljivost lesa.

V primeru lepljenja različnih vrst lesa, impregniranega z borom in njegovimi spojinami, ob uporabi polivinil acetatnega lepila, je bilo ugotovljeno, da se je zaradi impregnacije strižna trdnost lepilnih spojev znižala približno za četrtno. Le v primeru lepljenja impregniranega lesa rdečega bora je bilo zaznati malenkostno povečanje trdnosti spojev (Atar in sod., 2007).

2.1.2.2 Uporaba citronske kisline za modifikacijo lesa

Citronska kislina je nekoliko močnejša karboksilna kislina. Pri sobni temperaturi je v obliki belega kristalnega prahu. V naravi je prisotna v več vrstah sadja in zelenjave. Uporablja se tudi kot naravni konzervans.

Modifikacija bukovega lesa s citronsko kislino, zaradi dobre vezave s kemijskimi komponentami lesa, poveča njegovo dimenzijsko stabilnost in biološko odpornost. Krčenje in nabrekanje se tako zmanjša za do 40 %, medtem, ko se natezna trdnost lesa zmanjša za 50 %. Z zmanjševanjem deleža citronske kisline se zmanjšuje tudi upad natezne trdnosti (Despot in sod., 2008; Župčić, 2010). Impregnacija bukovine s citronsko kislino sicer ni bistveno izboljšala tlačne trdnosti lesa (Šefc in sod., 2012). Premazovanje površine bukovega lesa s citronsko kislino ne izboljša odpornosti na barvne spremembe površine lesa zaradi vpliva zunanjih dejavnikov staranja lesa (Miklečić in sod., 2011). Vodno raztopino citronske kisline so uspešno uporabili kot sredstvo za zmanjšanje dimenzijskih sprememb iveri v lesnih ploščah. Absorpcija vlage in debelinski nabrek iveri se je zmanjšal tudi do 75 % (Peyer in sod., 2000).

Umemura in sod. (2012) so proučevali zmožnost lepljenja, povezovanja lesa z uporabo citronske kisline kot vezivnega sredstva. Raziskovali so vpliv deleža citronske kisline na mehanske in kemijske lastnosti odpreškov lesa. Najboljše rezultate proučevanih mehanskih lastnosti so dosegli vzorci, pri katerih so uporabili 20 % raztopino citronske kisline. S povečevanjem deleža citronske kisline se je povečala tudi odpornost lesa proti povišani vlažnosti. Zaključili so, da bi lahko citronsko kislino uporabili kot samostojno vezivno sredstvo pri izdelavi odpreškov lesa, npr. ivernih in vlaknenih plošč.

2.1.2.3 Uporaba očetne kisline za modifikacijo lesa

Koncentrirana očetna kislina je zelo močna in jedka. Poznamo jo v obliki brezbarvne tekočine. V naravi nastaja npr. pri kisanju sadja zaradi bakterijske fermentacije.

Pri postopku modifikacije lesa z očetno kislino pride do substitucije (zamenjave) nekaterih hidroksilnih skupin v kemijski strukturi lesa z večjimi hidrofobnimi acetilnimi skupinami. Acetiliranje je torej proces, pri katerem poteče kemijska reakcija med prostimi hidroksilnimi skupinami lesa in očetno kislino ali anhidridom očetne kisline. Vlakna so tako bolj hidrofobna, acetiliran les pa je posledično dimenzijsko stabilnejši (Obataya in

Shibutani, 2005). Acetiliran les ima izboljšane tudi nekatere mehanske lastnosti (Šefc in sod., 2012).

2.2 VARJENJE LESA

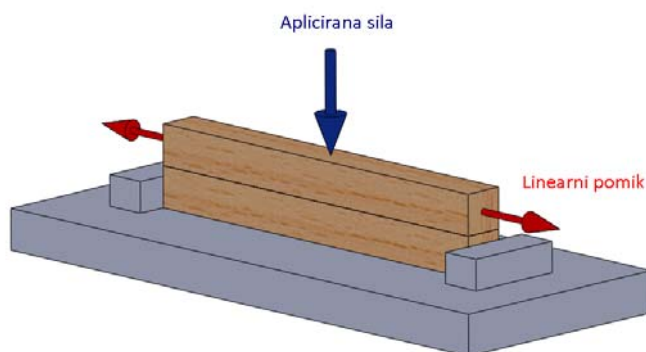
Varjenje lesa predstavlja nov način povezovanja dveh kosov lesa in proizvodnje okolju prijaznejših izdelkov, brez uporabe lepil ali kakršnih koli drugih povezovalnih elementov. Zaradi povzročitve trenja med dvema ploskvama, se v celicah lesa zgodijo spremembe kemijskih komponent, kot sta lignin in hemiceluloze, ki se stalita in začeta "teči". Mehanske lastnosti zvarjenega lesa so primerljive z mehanskimi lastnostmi lepljenega lesa. Edina omejitev tega načina spajanja lesa je, da je tako spojen les lahko uporaben zgolj v notranjih prostorih (Gfeller in sod., 2003; Leban, 2005; Leban in sod., 2005; Župčić, 2010). Ta način spajanja lesa uporabljamo za tvorjenje ploskovnih spojev na večjih površinah in ne za tvorjenje t.i. lokalnih oz. točkovnih spojev (Hahn in sod., 2012).

Prve raziskave na področju spajanja lesa z aplikacijo tlaka in torne toplote so bile opravljene leta 1996 v Nemčiji (Stamm in sod., 2005), ter so pripeljale do razvoja dveh tehnik varjenja masivnega lesa in lesnih plošč, in sicer z vibracijo in rotacijo. Vibracijsko varjenje lahko nadalje, odvisno od smeri vibriranja, delimo na linearno in krožno varjenje (Župčić, 2010). Glavna značilnost obeh metod je ustvarjanje sile trenja na kontaktnih površinah, ki sta v kontaktu in posledično generiranja toplote, ki zmehča ter stali amorfne kemijske komponente lesa. Pri tem se vlakna lesa med seboj ločijo in v naslednji fazi, fazi ohlajanja, med seboj prepletejo. Tako nastane zvar z visoko gostoto (Gfeller in sod., 2003; Leban, 2005, Stamm in sod., 2005).

Proces varjenja lahko razdelimo na šest posameznih faz, glede na glavne spremembe temperature in koeficienta trenja, ki se zgodijo v spoju. Glede na časovni potek bi lahko proces razdelili na čas vibracije in čas ohlajanja (Stamm in sod., 2005).

2.2.1 Linearno torni varjenje lesa

Proces v osnovi predstavlja aplikacija mehanskega trenja, pod tlakom, izmenično na dve ploskvi, ki ju želimo zvariti (Slika 1) (Leban, 2005).



Slika 1: Skica spajanja lesa z uporabo tehnike linearnega tornega varjenja

Torno varjenje je tehnika, pri kateri se toplota, potrebna za taljenje materiala, generira s pritiskanjem enega dela proti drugemu, s sočasnim hitrim vibriranjem ob določenih pomikih. Generirana toplota stali material na stiku v nekaj sekundah. Zatem se vibracija ustavi in dela mirujeta pod tlakom dokler se ne oblikuje trdna vez (Leban in sod., 2005). Oprema, ki jo uporabljamo za linearno tornno varjenje lesa, je enaka opremi za varjenje kovin. Parametri, ki vplivajo na lastnosti zvarjenega spoja, so: amplituda, frekvenca, tlak ob varjenju, kontaktni čas in tlak po procesu varjenja.

Proučevali so vpliv velikosti parametrov varjenja smrekovine in bukovine na natezno trdnost ter ostale lastnosti varjenega spoja. Največji vpliv na natezno-strižno trdnost spojev varjenega lesa imajo tlak varjenja, čas varjenja in čas ohlajanja po varjenju (Vaziri in sod., 2012). Največja natezna trdnost, ki običajno doseže do 10 MPa in torej dosega zahteve evropskega standarda EN 205, je bila dosežena pri amplitudi 3 mm, frekvenci 100 oz. 150 Hz, tlaku varjenja med 1,3 in 2,3 MPa, času varjenja med 3 in 5 s, ohranjanju tlaka po varjenju 2,5 MPa ter času ohlajanja 60 s. Povečevanje trajanja časa varjenja poslabša natezno trdnost spojev, povečevanje tlaka pri varjenju pa povzroči degradacijo spoja. S spreminjanjem parametrov v procesu varjenja so nekateri spoji dosegli višjo natezno-strižno trdnost, kot lepilni spoji, pri katerih so za lepljenje lesa uporabili PVAc lepilo (Gfeller in sod., 2003; Vaziri in sod., 2012). V primeru porušitve vezi med dvema zvarjenima kosoma lesa, se le-ta izvrši v območju varjenega spoja (Hahn in sod., 2012).

Porazdelitev gostote lesa v območju varjenega spoja lahko ugotovimo s presevanjem z X – žarki. Debelina območja v okolici varjenega spoja, kjer se zgodijo spremembe v gostoti lesa, znaša od 1,5 do 2,8 mm, odvisno od uporabljenih parametrov pri varjenju. Na stopnjo zgostitve lesa v coni varjenja imajo največji vpliv tlak in čas varjenja, ter vrsta uporabljenega lesa. Gostota lesa se tako v območju varjenega spoja lahko poviša tudi za 90 % (Vaziri in sod., 2011a). Opazovanja porazdelitve gostote v primeru uporabe lesa javorja

(*Acer* spp.) so pokazala, da se je gostota v sredini varjenih vzorcev zvišala s prvotnih 790 na približno 950 kg/m³ (Ganne-Chedeville in sod., 2006).

Meritve z nuklearno magnetno resonanco (NMR) in opazovanja varjenega spoja lesa z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM) so pokazala, da vez med dvema zvarjenima kosoma lesa nastane zaradi taljenja in tečenja amorfne polimera, ki povezuje celice lesa v njegovi strukturi. Temperatura v spoju med varjenjem namreč doseže med 200 in 250 °C. Gre torej za taljenje srednje lamele, medtem ko celice lesa ostajajo dokaj nepoškodovane. S spektri NMR so bile zaznane nekatere kemijske reakcije, ki nakazujejo, da gre pri formiranju spoja varjenega lesa tudi za tvorjenje kemijskih vezi med ligninom in furfurali iz hemiceluloz. Sklepajo, da je to razlog zakaj daljši čas ohlajanja poveča trdnost spojev (Gfeller in sod., 2003; Ganne-Chedeville in sod., 2006; Stamm in sod. 2006; Belleville in sod., 2013).

Pri varjenju lesa raztreseno poroznih listavcev se varjeni spoj, za razliko od varjenja lesa iglavcev, formira bolj enakomerno, v isti liniji, saj so razlike v anatomske sestavi lesa manjše (Gfeller in sod., 2003). Proučevali so tudi vpliv usmerjenosti vlaken na prečnem prerezu varjenega lesa na strižno trdnost spojev in ugotovili, da je ta parameter pri varjenju lesa manj pomemben (Omrani in sod., 2010), veliko vplivnejša pa je usmerjenost vlaken v vzdolžni smeri (Omrani in sod., 2013a).

Z okoljskega vidika so pri procesu varjenja morda najbolj vprašljive emisije, ki se ob tem pojavijo. Zaradi trenja namreč ob vibriranju iz nastajajočega spoja izhaja veliko dima. Nastale hlapne organske spojine so proučili s plinsko kromatografijo in masno spektrometrijo in ugotovili, da iz lesa večinoma pride do izhajanja vodne pare, v manjši meri pa tudi CO₂, degradacijskih produktov ogljikovih hidratov (v primeru bukovine ksilan iz hemiceluloz) in amorfne lignina. Po zaključku varjenja emisij plinov niso zaznali (Omrani in sod., 2008).

2.2.1.1 Vpliv vlažnosti lesa na lastnosti varjenega spoja

Ena glavnih pomanjkljivosti varjenega lesa je njegova občutljivost na vlago, ki povzroča razpad spoja. To je tudi glavni razlog, zaradi katerega tehnike varjenja lesa ni smiselno uporabiti za spajanje konstrukcijskega lesa (Vaziri in sod., 2010). V splošnem velja, da višja ravnovesna vlažnost varjenega lesa pomeni zmanjšanje trdnosti varjenih spojev (Stamm in sod., 2011). S spreminjanjem parametrov pri varjenju in lastnostmi uporabljenega lesa do neke mere lahko povečamo odpornost varjenega lesa na povišano

vlažnost. S tretiranjem spoja z naravnimi in okolju prijaznimi sredstvi pa to lastnost lahko še izboljšamo (Vaziri in sod., 2011b).

Distribucijo in obnašanje absorbirane vode znotraj varjenega spoja ter morebitne porušitve lahko opazujemo z uporabo nuklearne magnetne resonance (NMR). Tako je bilo ugotovljeno, da se ob izpostavitvi varjenega lesa povišani vlagi v okolici, navzem in navlaževanje lesa začne na robovih spojev. To povzroči nabrekanje lesa iz zunanje strani proti notranjosti in posledično razpad spoja, kar se v primeru varjenja lesa bukovine zgodi že po eni uri namakanja lesa v tekoči vodi (Vaziri in sod., 2011b).

V raziskavi, opravljeni na vzorcih varjenega lesa rdečega bora (*Pinus sylvestris*), je bilo z uporabo naprave za presevanje z X - žarki ugotovljeno, da imajo največji vpliv na začetek nastajanja razpok v varjenem spoju nastavitve pri operaciji varjenja (tlak in čas) ter lastnosti lesa (uporaba jedrovine) (Vaziri in sod., 2010). S pravilno izbiro parametrov torej lahko upočasnimo nastajanja razpok v spoju. Les rdečega bora vsebuje tudi mešanico terpentinskih kislin, smol, ki so prispevale k višji odpornosti spojev na povišano vlažnost. Ugotovili so, da so se zaradi povišane temperature med varjenjem, smole stalile in koncentrirale v območju spoja, zato je tudi voda težje prodrla v prostor med zvarjenima deloma (Mansouri in sod., 2011). Na hitrost prodiranja in vezavo vode v varjen les vplivajo tudi druge snovi, ki so prisotne v lesu, kot so na primer voski, alkoholi, maščobe in maščobne kisline (Vaziri in sod., 2011b).

Odpornost varjenega lesa na povišano vlažnost so poskušali izboljšati z uporabo acetiliranega lignina (Pizzi in sod., 2013), vendar se je izkazalo, da ta sicer dobro zaščiti spoj pred navlaževanjem, vendar so bile izmerjene vrednosti trdnosti spojev po izpostavitvi višji vlagi, vseeno nizke. S tehniko potapljanja so, pred procesom varjenja, v les bukve vnesli 25 % raztopino smole in etanola. Ugotovili so, da se je odpornost spojev na povišano vlažnost lesa povečala. Nekateri vzorci so imeli še vedno zadovoljivo trdnost tudi po 18 dneh namakanja v hladni vodi (Pizzi in sod., 2011).

Izdelali so tudi masivne lesne plošče, katerih elemente so širinsko spojili z bukovimi moznički, ki so jih pred postopkom mozničnega varjenja potopili v sončnično olje. Uporaba sončničnega olja je izboljšala natezno trdnost mozničnih spojev. Po 24 urah namakanja v hladni vodi je bila natezna trdnost spojev z impregniranimi moznički občutno višja, kot v primeru uporabe neimpregniranih mozničkov (Segovia in sod., 2013), v primeru mozničnega varjenja pa ima impregnacija mozničkov pred varjenjem še nekatere druge prednosti.

Po drugi strani lahko na odpornost spojev linearno varjenega lesa proti povišani vlažnosti vplivamo s spremembo parametrov v procesu varjenja, na primer z nastavitvijo višje frekvence pri varjenju, z zmanjšanjem amplitude varjenja in s podaljšanjem časa varjenja. Posledično vlakna lesa v spoju ostanejo manj poškodovana in so bolj povezana z osnovnim tkivom. Zvarjen spoj ostane bolj zaprt, kar je prepreči prodiranje vode v notranjost spoja (Mansouri in sod., 2009; Pizzi in sod., 2011). Čas varjenja, dosežena maksimalna temperatura pri varjenju in vlagoodpornost varjenega spoja so tako v obratnem sorazmerju (Omrani in sod., 2013b).

Ena od možnosti, ki še ostaja aktualna, je povečanje odpornosti varjenih spojev lesa z dimenzioniranjem spojev oz. njihovo geometrijo (Pizzi in sod., 2010; Hahn in sod., 2012), pri čemer so poskusili omogočiti tudi izhajanje vode iz lesa med postopkom varjenja (Omrani in sod., 2009).

2.2.1.2 Varjenje modificiranega lesa

Trdnost spojev varjenega termično modificiranega (TM) lesa je približno za polovico manjša od trdnosti nemodificiranega, naravnega lesa. V območju varjenega spoja je zaznana večja lomljivost vlaken (Boonstra in sod., 2006; Župčić, 2010).

Omrani in sod. (2010) so ugotovili, da pregrevanje kontaktnih površin nad temperaturo 85 °C že povzroči spremembe, ki signifikantno zmanjšajo strižno trdnost varjenih spojev. Strižna trdnost spojev namreč takrat upade kar na tretjino prvotne.

Poslabšane mehanske lastnosti TM lesa so tako pričakovane, saj se med postopkom termične modifikacije v lesu zgodijo spremembe v smislu premreženja lignina in porušitve celic. Varjeni spoj pa nastane prav s taljenjem, tečenjem, utrditvijo in premreženjem amorfnih komponent v lesu, predvsem ligninom in hemicelulozami. Premrežena struktura oz. kompozit vlaken lesa z veliko višjo gostoto od normalnega lesa tako nastane na stiku s taljenim in ponovno utrjenim ligninsko-hemicelulznim matriksom. Za varjenje TM lesa morajo biti pogoji pri varjenju nekoliko bolj ekstremni (višji tlak in daljši čas po zaključku faze varjenja) (Boonstra in sod., 2006).

Župčić (2010) je v opravljeni raziskavi poskušal možnično zvariti TM les, možnike pa je dodatno tretiral z 10,5 % raztopino citronske kisline, z namenom povečanja izvlečne sile možnikov. Ugotovil je, da modifikacija povzroči zmanjšanje sile potrebne za izvelek

moznika. Kakovost moznično varjenega spoja, v primerjavi z lepljenjem lesa s PVAc lepilom, se je zmanjšala.

2.3 UREA-FORMALDEHIDNO LEPILO

Najpomembnejša aminoplastična lepila v lesni industriji so urea-formaldehidna (UF) in melamin-formaldehidna (MF) lepila, pri čemer so UF lepila zaradi bistveno nižje cene mnogo bolj razširjena kot MF. Aminoplastična lepila so polimerni produkti, ki nastanejo pri reakciji polikondenzacije med spojinami z amino skupinami ($-NH_2$) in aldehydom. V primeru UF lepil je spojina z amino skupino urea oz. sečnina, uporabljen aldehyd pa je formaldehyd.

Urea je bel, hidroskopičen, kristalen prah brez vonja, ki je topen v vodi. Formaldehyd je zelo reaktiven plin jedkega in neprijetnega vonja, ki draži sluznico in povzroča solzenje in ima kancerogene lastnosti. Reakcija med ureo in formaldehydom je zelo kompleksna in lahko vodi do linearnih, razvejanih ali tridimenzionalnih struktur v utrjenem lepilu.

Utrjevanje UF lepil je kemijski in fizikalni proces. Kemijski proces predstavlja nadaljevanje reakcije polikondenzacije, ki je bila zavrta oziroma ustavljena pri izdelavi lepila, fizikalni proces pa oddajanje disperzijskega sredstva in pri reakciji nastale vode. Utrjevanje lepila pospešimo z dodatkom kislega katalizatorja, z dovajanjem toplotne energije, ali s kombinacijo obeh, kar je v praksi najpogostejše (Resnik, 1997; Šernek in Kutnar, 2009).

Katalizator zniža vrednost pH UF lepil pod 7, zato ta lepila dokončno utrdijo pod kislimi pogoji. Poleg temperature lepljenja je bistvenega pomena še količina dodanega katalizatorja, ki mora biti optimalen, saj v primeru nezadostne količine pride do prepočasnega utrjevanja. Ugovšek in Šernek (2012) sta z diferenčno dinamično kalorimetrijo (DSC) ugotovila, da je optimalna količina dodanega katalizatorja UF lepilu Lendur - 200 znašala 1 %.

2.3.1 Lepljenje TM lesa z UF lepilom

Termična modifikacija lesa poleg zaželenih efektov (npr. povečana dimenzijska stabilnost) za tvorbo dobrega lepilnega spoja povzroči tudi spremembe v negativnem smislu. Uporabo konstrukcijskih duromernih lepil za lepljenje TM lesa so proučevali Šernek in sod. (2008).

Znano je, da površina TM lesa postane hidrofobna, manj aktivna za lepljenje. Zmanjšanje števila prostih hidroksilnih skupin povzroči slabšo omočljivost površine lepljenca in posledično vezavo molekul lepila. Znižanje vrednosti pH takšnega lesa (na vrednost od 3,5 do 4) lahko povzroči počasnejše ali hitrejše utrjevanje lepila, kar je odvisno od vrste lepila (Kariž in Šernek, 2008).

Termična modifikacija lesa povzroči zmanjšanje mase, vendar se trdnost lepilnega spoja UF lepila po drugi strani drastično ne spremeni. Lepilni spoji tvorjeni z UF lepilom so v normalnih klimatskih pogojih še vedno dosegali vrednosti okoli 8 N/mm^2 . Temperaturni režim pri postopku modifikacije bistveno ne vpliva na trdnost UF lepilnih spojev suhih vzorcev lesa, vseeno pa je z naraščanjem temperature tretiranja zaznati manjši upad strižne trdnosti in porast deleža loma po lesu (Šernek in sod., 2007).

2.4 UVRŠČANJE SPOJENEGA LESA V TRAJNOSTNE RAZREDE

Namen raziskovalnega dela je bil ta, da proučimo obnašanje varjenega lesa ob izpostavitvi povišani vlažnosti v okolici. Na podlagi pridobljenih podatkov iz preteklih raziskav lahko povzamemo, da se les spojen s tehniko linearnega tornega varjenja lahko uporablja le v suhih klimatskih pogojih in zaradi nižje trdnosti spojev ni namenjen za konstrukcijsko uporabo.

Pripravljene vzorce lesa smo v eksperimentalnem delu naloge preverili v skladu s standardom SIST EN 12765, na podlagi katerega razvrščamo duromerna lepila za nekonstrukcijsko uporabo. Pogosto uporabljeno lepilo, katerega lastnosti spojev preverjamo po omenjenem standardu, je UF lepilo. Standard SIST EN 12765 razvršča duromerna lepila za les za nekonstrukcijsko uporabo v štiri trajnostne razrede (C1 do C4). Za vsak trajnostni razred je definirano področje uporabe in klimatski pogoji (Preglednica 1).

Preglednica 1: Področja uporabe in klimatski pogoji glede na trajnostni razred duromernih lepil za lepljenje lesa za nekonstrukcijsko uporabo

TRAJNOSTNI RAZRED	PRIMER KLIMATSKIH POGOJEV IN PODROČJE UPORABE
C1	Notranja uporaba, kjer je ravnovesna vlažnost lesa $u_r < 15 \%$
C2	Notranja uporaba, z občasnimi kratkotrajnimi izpostavitvami kondenzirani vodi in/ali občasno visoki RZV, kjer je ravnovesna vlažnost lesa $u_r < 18 \%$
C3	Notranja uporaba, s pogostimi kratkotrajnimi izpostavitvami tekoči in kondenzirani vodi in/ali visoki RZV. Zunanja uporaba v pokritih prostorih.

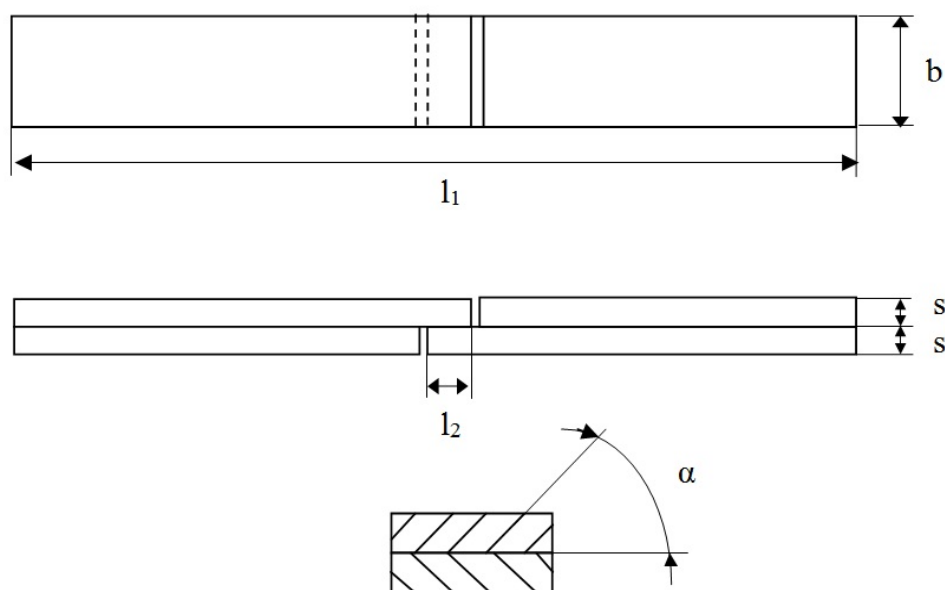
C4	Notranja uporaba, s pogostimi dolgotrajnimi izpostavitvami tekoči in kondenzirani vodi. Zunanja uporaba, kjer so izdelki izpostavljeni neposrednim vremenskim vplivom, so pa površinsko zaščiteni.
-----------	--

Za uvrstitev v določen trajnostni razred mora pripravljen spoj lesa torej prestat določene zahteve. V standardu so podane minimalne vrednosti trdnosti, ki jih mora spoj doseči med testiranjem (Preglednica 2).

Preglednica 2: Način priprave vzorcev za razvrščanje duromernih lepil za lepljenje lesa za nekonstrukcijsko uporabo v trajnostne razrede

NAČIN PRIPRAVE VZORCEV		Trdnost lepilnega spoja v N/mm ² Trajnostni razred			
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 s $T = 20 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$		≥ 7	≥ 7	≥ 7
3	7 dni v standardni klimi, 3 ure v vodi s $T = 67 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 uri v vodi s $T = 20 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$			≥ 4	
4	7 dni v standardni klimi, 3 ure v vreli vodi, 2 uri v vodi s $T = 20 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$				≥ 4

Način izdelave preizkušancev za ugotavljanje natezne strižne trdnosti spojev s preklpom pa opisuje standard SIST EN 205: 2003. Za vsako vrsto uporabljenega sredstva za spajanje je potrebno preizkusiti minimalno 10 preizkušancev, izmeriti in podati njihovo trdnost, ter po opravljeni meritvi vizualno oceniti delež loma po lesu. Skica preizkušanca je prikazana na Sliki 2.



Slika 2: Skica preizkušanca za ugotavljanje strižne trdnosti lepilnih spojev

- $l_1 = 150 \text{ mm}$ - celotna dolžina preizkušanca
- $b = 20 \text{ mm}$ - širina preizkušanca (širina strižne površine)
- $l_2 = 10 \text{ mm}$ - dolžina preklopa (dolžina strižne površine)
- $s = 5 \text{ mm}$ - debelina lamel
- $\alpha = 30^\circ \text{ do } 90^\circ$ - kot med braniko in lepilno površino

3 MATERIAL IN METODE

3.1 MATERIAL

3.1.1 Les

Uporabili smo les navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.), katerega povprečna gostota v absolutno suhem stanju je okoli 680 kg/m^3 in les termično modificirane (TM) bukovine. Ravnovesna vlažnost lesa je v primeru naravne bukovine znašala 10,1 oz. 12,9 %, v primeru TM bukovine pa je bila nekoliko nižja in sicer 4,2 oz. 8,7 % (Preglednica 3).

3.1.2 Raztopine kislin

Uporabili smo 99,8 % borovo kislino in 99,8 % očetno kislino proizvajalca Sigma-Aldrich in monohidrat citronske kisline, proizvajalca Merck Millipore. 10 in 20 % raztopine posameznih kislin smo pripravili z raztapljanjem oz. redčenjem le-teh v destilirani vodi.

3.1.3 Urea-formaldehidno lepilo

Pri pripravi primerjalnih preizkušancev smo uporabili 200 g urea-formaldehidnega (UF) lepila Lendur 200, proizvajalca Nafta-Petrochem d.o.o. iz Lendave. Pred samim lepljenjem smo mu dodali 10,4 g moke in 2,05 g katalizatorja amonijevega sulfata.

3.1.4 Lamelle za izdelavo preizkušancev zlepljenih z UF lepilom

Iz uporabljenega lesa smo v skladu s standardom pripravili lamelle debeline 5 mm. Kot med branikami (letnicami) in površino za lepljenje je bil med 30 in 90 °. Lamelle so bile sveže poskobljane, s čimer smo zagotovili gladko in čisto lepilno površino.

3.2 METODE

Na začetku smo načrtovane eksperimente razdelili glede na uporabljeno vrsto materiala. Odločili smo se za uporabo bukovine (*Fagus sylvatica* L.), ki velja za eno največkrat uporabljenih lesnih vrst v Sloveniji. Za bukovino sta značilni slaba trajnost v zunanjih klimatskih pogojih in dimenzijska nestabilnost, kar lahko izboljšamo s termično modifikacijo lesa. Zato smo se odločili, da bomo v raziskavi uporabili tudi les termično modificirane (TM) bukovine.

Nadalje smo vzorce razdelili glede na način spajanja; večji del vzorcev smo tako spojili s tehniko linearnega tornega varjenja, del vzorcev pa zlepili z urea-formaldehidnim (UF) lepilom, ki se največkrat uporablja za lepljenje lesa namenjenega za uporabo v notranjih prostorih.

V naslednjem koraku smo se osredotočili na vpliv dosežene ravnovesne vlažnosti lesa pred postopkom varjenja. Zanimalo nas je torej, kakšen vpliv na lastnosti spoja ima ravnovesna vlažnost varjenega lesa.

Za doseganje višje dimenzijske stabilnosti, odpornosti proti povišani vlažnosti in višje strižne trdnosti smo izbrali raztopine različnih kislin. Na podlagi literature smo se odločili za uporabo treh kislin, ki so sicer prisotne tudi v naravi: borove, citronske in očetne kisline. Zaradi prvotne visoke kislosti vseh uporabljenih kislin, smo v raziskavi uporabili njihove 10 % raztopine, v primeru citronske kisline pa tudi 20 % raztopino.

V zadnjem delu pa smo načrtovan eksperiment razdelili glede na uporabljeno tehniko vnašanja raztopin kislin v vzorce lesa. Raztopine posameznih kislin smo na kontaktne površine lepljencev nanegli s premazovanjem, v primeru citronske kisline pa smo del vzorcev vakuumsko impregnirali. Za primerjavo končnih lastnosti spojev smo nekaj vzorcev pustili netretiranih.

V Preglednici 3 je prikazan načrt raziskovalnega dela in oznake vzorcev, ki smo jih proučevali v raziskovalnem delu.

Preglednica 3: Razdelitev načrtovanega dela z vzorci, obravnavanimi v raziskovalnem delu

VRSTA MATERIALA	NAČIN SPAJANJA VZORCEV	KLIMATSKI POGOJI SHRANJEVANJA	VLAŽNOST LESA	UPORABLJENA KISLINA	NAČIN TRETIRANJA	OZNAKA VZORCEV
BUKOVINA	Varjenje lesa	20 °C / 65 %	10,1	/	Netretirano	BN
		20 °C / 65 %	10,1	10 % raz. borove k.	Premazovanje	BB
		20 °C / 65 %	10,1	10 % raz. citronske k.	Premazovanje	BC
		20 °C / 65 %	10,1	10 % raz. očetne k.	Premazovanje	BO
		20 °C / 65 %	10,1	10 % raz. citronske k.	Vak. impregnacija	BC-V10
		20 °C / 85 %	12,9	/	Netretirano	B 85/20
	Lepljenje z UF lepilom	20 °C / 65 %	10,1	/	Premazovanje	BUF
TM BUKOVINA	Varjenje lesa	20 °C / 65 %	4,2	/	Netretirano	MN
		20 °C / 65 %	4,2	10 % raz. borove k.	Premazovanje	MB
		20 °C / 65 %	4,2	10 % raz. citronske k.	Premazovanje	MC
		20 °C / 65 %	4,2	10 % raz. očetne k.	Premazovanje	MO
		20 °C / 65 %	4,2	10 % raz. citronske k.	Vak. impregnacija	MC-V10
		20 °C / 65 %	4,2	20 % raz. citronske k.	Premazovanje	MC-20
		20 °C / 65 %	4,2	20 % raz. citronske k.	Vak. impregnacija	MC-V20
	Lepljenje z UF lepilom	20 °C / 85 %	8,7	/	Netretirano	M 85/20
		20 °C / 65 %	4,2	/	Premazovanje	MUF

3.2.1 Termična modifikacija lesa

Termično modifikacijo lesa bukovine smo izvedli v komori za termično modifikacijo lesa podjetja Silvaproduct d.o.o. (Slika 3). Masivni bukov les je bil izotermično modificiran v inertni atmosferi z intaktnim vakuumom. Postopek modifikacije lesa je bil izveden v 3 urah, pri temperaturi 210 °C. Pred začetkom in po zaključku faze tretiranja je bil les 12 ur izpostavljen temperaturi 103 ± 2 °C.



Slika 3: Komora za vakuumsko modifikacijo lesa v podjetju Silvaproduct d.o.o.

3.2.2 Priprava lesa

Zaradi načina izvedbe eksperimenta linearnega tornega varjenja lesa je bilo potrebno ves les najprej pripraviti. Plohe nemodificirane in TM bukovine smo najprej razžagali in poskobljali ter pripravili letve preseka približno 22×22 mm. Tako pripravljen les smo nato shranili v prostoru s temperaturo $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ in relativno zračno vlažnostjo (RZV) 65 oz. 85 %.

3.2.3 Tretiranje površine lesa z raztopinami kislin

Iz predhodno pripravljenega lesa smo pripravili vzorce dimenzij $20 \times 20 \times 200$ mm. Površina, na katero smo nanegli posamezno raztopino, je bila predhodno sveže poskobljana.

Najprej smo pripravili 100 mL 10 oz. 20 % raztopine posamezne kisline. Redčenje smo izvedli z destilirano vodo. Zmes smo dobro premešali. Nato smo vzeli posamezen kos vzorca (polovičko) in na sveže poskobljano površino s čopičem nanegli približno 0,5 g oz. 1 pripravljenе raztopine (Slika 4). Na posamezen spoj smo tako nanegli približno 1 g oz. 2 g raztopine. Počakali smo toliko časa, da se je površina nekoliko osušila, nato pa smo vzorce postavili v prostor s standardno klimo $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ in 65 % RZV za 24 ur. Po pretečenem času smo vzorce zvarili na stroju za linearno torno varjenje lesa.



Slika 4: Nanašanje raztopin na površino vzorcev

Pri nanašanju kislin na površino TM bukovine smo nekoliko podaljšali čas sušenja vzorcev po nanosu kislin, saj so se te sušile nekoliko počasneje.

3.2.4 Impregnacija lesa z raztopino citronske kisline

Po opravljenem prvem delu eksperimentov smo se odločili osredotočiti na uporabo citronske kisline, kot sredstva za povečanje dimenzijske stabilnosti lesa. Zato smo se odločili, da bomo nekaj vzorcev lesa tudi vakuumsko impregnirali z 10 % in nato še z 20 % raztopino citronske kisline.

Predvidevali smo namreč, da bi bilo morda učinkoviteje, če les pred varjenjem impregniramo z uporabljenim sredstvom, ki prispeva k njegovi večji dimenzijski stabilnosti.

Grobo obžagane vzorce naravne in TM bukovine smo najprej 10 minut impregnirali v vakuumu in jih nato pustili potopljene v raztopini še eno uro. Vakuumsko impregnacijo vzorcev smo izvedli v eksikatorju. Podtlak smo vzpostavili z uporabo vakuumske črpalke (Slika 5). Tako so bili vzorci impregnirani z raztopino citronske kisline po celotnem volumnu.



Slika 5: Vakuumsko impregnacija vzorcev z raztopinami kislin

Po pretečenem času smo vzorce vzeli iz tekočine, jih obrisali in nato postavili v sušilnik dokler vzorci niso dosegli enake mase kot pred impregnacijo. Tako posušene vzorce smo nato postavili v prostor s standardno klimo, za 24 ur. Sledil je proces varjenja na stroju za linearno torni varjenje lesa, ob uporabi enakih parametrov, kot v primeru varjenja vzorcev, ki so imeli raztopine kislin nanese ne zgolj na površini.

Po izvedeni vakuumski impregnaciji in obžagovanju vzorcev je bilo opaziti, da je pri nekaterih vzorcih lesa prišlo tudi do nastanka notranjih razpok.

Število pripravljenih vzorcev naravne in TM bukovine, vakuumsko impregniranih z 10 oz. 20 % raztopino citronske kisline, je bilo zaradi pomanjkanja količine raztopine, nekoliko manjše od predpisanih v standardu, ki zahteva pripravo in testiranje minimalno 10 preizkušancev.

3.2.5 Varjenje lesa

Varjenje lesa smo izvedli v napravi za linearno torni varjenje lesa KLN Ultraschall LVW-2261 (Slika 6), ki je prvotno zasnovana za varjenje termoplastov.



Slika 6: Naprava za linearno torni varjenje lesa KLN Ultraschall LVW-2261

Posamezna kosa pripravljenega lesa smo vstavili in vpeli v čeljusti stroja, ter ju med seboj približali (Slika 7). Preko komandnega zaslona smo nato zagnali avtomatski postopek varjenja, po predhodno nastavljenih parametrih.



Slika 7: Vzorca lesa, vpeta v čeljusti stroja za varjenje lesa

Varjenje vzorcev iz naravne in TM bukovine je torej potekalo pri različnih parametrih (Preglednica 4).

Preglednica 4: Nastavljeni parametri pri varjenju lesa

Vrsta materiala	Parameter varjenja (po stopnjah)										Faza ohlajanja	
	Amplituda [mm]			Čas [s]			Tlak [MPa]			Frekvenca [Hz]	Čas [s]	Tlak [MPa]
	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
BUKOVINA	1	2	2	1	2	2	0,75	1,25	1,75	150	30	1,75
TM BUKOVINA	1	2	2	1	2	2	1,25	1,5	1,75	150	45	2,50

Vse zvarjene vzorce smo nato shranili v prostoru s standardno klimo 20 °C / 65 % RZV.

3.2.6 Merjenje gostotnih profilov varjenega lesa

Po opravljenem postopku varjenja lesa smo opravili še meritve porazdelitve gostote po preseku zvarjenih vzorcev, s presevanjem vzorcev lesa z X - žarki. Meritve smo izvajali z napravo DAX 5000, proizvajalca GreCon (Slika 8), ki je prvotno namenjena za merjenje gostotnih profilov lesnih plošč.

Iz vsake vrste zvarjenih vzorcev smo izžagali manjše vzorčke, velikost približno 50 × 20 × 10 mm (Slika 9). Posamezen vzoreček smo nato vpeli v merilno celico naprave in izvedli meritve.



Slika 8: Naprava za merjenje gostotnih profilov z X – žarki GreCon DAX 5000



Slika 9: Pripravljene vzorce za merjenje gostotnih profilov

3.2.7 Lepljenje lesa z UF lepilom

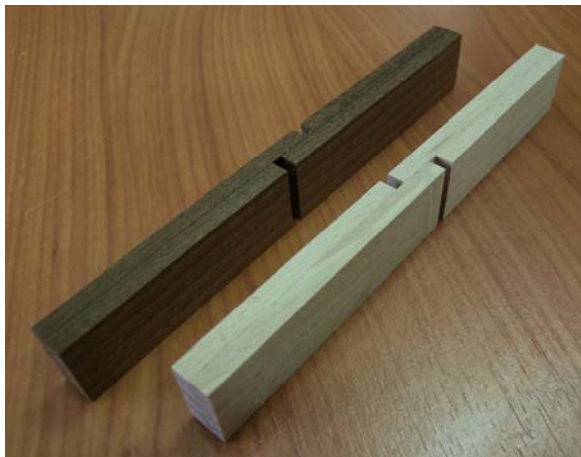
Strižno trdnost varjenih spojev lesa smo želeli primerjati z UF lepilnimi spoji. Zato smo pripravili še dodatne preizkušance, ki so bili lepljeni. Na dve lameli iz naravne in TM bukovine smo z ročnim nanašalnim valjem nanesli približno 16 g oz. 200 g/m² pripravljenega UF lepila. Tako pripravljene lepljence smo nato pri temperaturi 105 °C in specifičnem tlaku stiskanja 18 MPa, 7 minut stiskali v laboratorijski stiskalnici. Temperatura stiskalnice je znašala približno 105 °C, kar smo spremljali tudi s termočlenom, ki smo ga predhodno vstavili v lepilni spoj. Pred izdelavo preizkušancev smo lepljence 7 dni klimatizirali v standardni klimi, pri temperaturi 20 °C in RZV 65 %.

3.2.8 Priprava preizkušancev za ugotavljanje strižne trdnosti spojev

Preizkušance smo pripravili v skladu z zahtevami standarda SIST EN 12765: 2002, ki razvršča duromerna lepila za les za nekonstrukcijsko uporabo in le-ta na podlagi izmerjene natezno-strižne trdnosti razvršča v štiri trajnostne razrede, od C1 do C4. Za uvrstitev v posamezni trajnostni razred, morajo formirani spoji lesa po posameznem načinu priprave dosegati določeno natezno-strižno trdnost.

Zaradi nenatančnega načina vpetja na stroju za varjenje, obe polovici, ki skupaj tvorita zvarjeni vzorec, po širini nista bili poravnani. Vzorce tako naravne kot TM bukovine je bilo tako potrebno po varjenju še dodatno obrezati in poskobljati, da so imeli prerez pravokotne oblike.

Iz vseh zvarjenih vzorcev in lamel zlepljenih z UF lepilom, smo na krožnem žagalnem stroju izžagali 150 mm dolge in 20 mm široke preizkušance (Slika 10). V preizkušance smo zažagali po dva 2,5 mm široka utora tako globoko, da smo ravno prežagali varjeni oz. lepilni spoj. Dolžina preklopa oziroma strižne ploskve preizkušanca je bila 10 mm.



Slika 10: Izdelani preizkušanci za ugotavljanje natezno strižne trdnosti

3.2.8.1 Priprava preizkušancev v skladu s 1. načinom priprave

Za preizkušanje spojenega lesa po 1. načinu priprave, smo preizkušance za 7 dni postavili v klimatizacijsko komoro s temperaturo 20 °C in RZV 65 %. Po pretečenem obdobju smo destruktivno izmerili strižno trdnost varjenih oz. zlepljenih spojev.

3.2.8.2 Priprava preizkušancev v skladu z 2. načinom priprave

Sledilo je preizkušanje varjenih oz. zlepljenih spojev naravne in TM bukovine v skladu s pripravo preizkušancev po drugem načinu priprave standarda SIST EN 12765: 2002, saj je večina le-teh izkazovala zadovoljivo trdnost po zahtevah prvega trajnostnega razreda. Preizkušance smo po klimatiziranju v standardni klimi za 24 ur potopili v kad (Laboratorijska oprema Kambič) napolnjeno z vodo s temperaturo 20 °C (Slika 11) tako, da so preizkušanci prosto plavali. Po pretečenem obdobju smo preizkušance vzeli iz vode in takoj opravili strižni test.



Slika 11: Vzorci potopljeni v kad napolnjeno z vodo

3.2.8.3 Priprava preizkušancev v skladu s 3. načinom priprave

Ker je del zvarjenih vzorcev po 24 urnem namakanju v hladni vodi še vedno izkazoval določeno trdnost, smo se odločili, da zvarjene vzorce lesa in vzorce zlepljene z UF lepilom pripravimo in nato preizkusimo še v skladu s 3. načinom priprave.

Pripravljene preizkušance je bilo potrebno po 7 dnevni klimatizaciji v standardni klimi, za 3 ure potopiti v vodo s temperaturo 67 °C, nato pa jih za 2 uri postaviti še v vodo s temperaturo 20 °C.

3.2.8.4 Priprava preizkušancev v skladu s 4. načinom priprave

Preizkušance smo za konec pripravili še v skladu z 4. načinom priprave, za preizkus uvrstitve v najvišji trajnostni razred. Preizkušance smo po 7 dnevni klimatizaciji v standardni klimi, za 3 ure potopili vrelo vodo, nato pa jih še 2 uri ohlajali v vodi s temperaturo 20 °C.

3.2.9 Ugotavljanje strižne trdnosti lepilnih spojev

Strižne teste lepilnih spojev smo opravili na univerzalnem testirnem stroju ZWICK/Z005 v skladu s standardom SIST EN 205: 2003 (Slika 12). Strižne preizkušance smo obremenjevali s hitrostjo 6 mm/min.



Slika 12: Preizkušanje strižne trdnosti lepilnih in zvarjenih spojev na univerzalnem testirnem stroju ZWICK/Z005

Strižno trdnost smo izračunali po enačbi:

$$\tau = \frac{F_{\max}}{A} = \frac{F_{\max}}{l_2 \cdot b} \quad \dots (1)$$

- $F_{\max}$ - Izmerjena maksimalna sila [N]
- A - Površina strižne ploskve [mm^2]
- l_2 - Dolžina strižne ploskve [mm]
- b - Širina strižne ploskve [mm]

Po koncu meritve smo vizualno določili delež loma po lesu v porušenem lepilnem spoju, z ocenami od 0 do 100 %. Delež loma po lesu 0 % je tako pomenil, da se je porušitev vzorca izvršila le v območju zvarjenega oz. zlepljenega spoja.

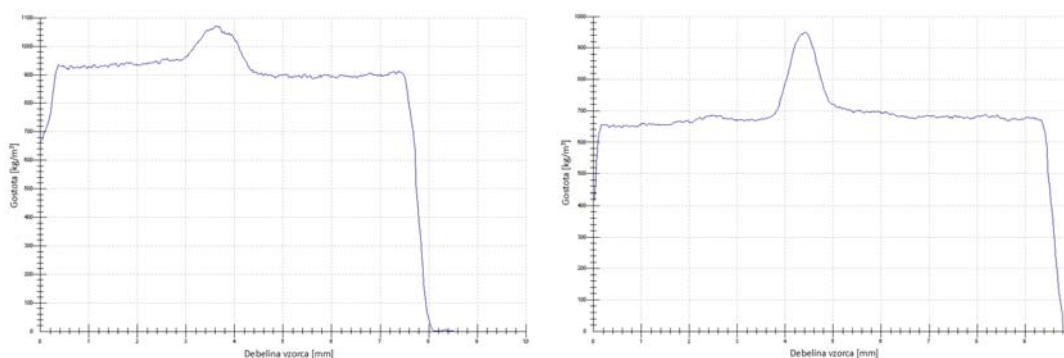
4 REZULTATI IN RAZPRAVA

4.1 PORAZDELITVE GOSTOTE VARJENIH VZORCEV

Po opravljenih postopkih varjenja lesa, smo s tehniko presevanja z X – žarki izmerili gostoto materiala v ožjem območju okoli zvarov.

4.1.1 Gostotna profila varjenega netretiranega lesa

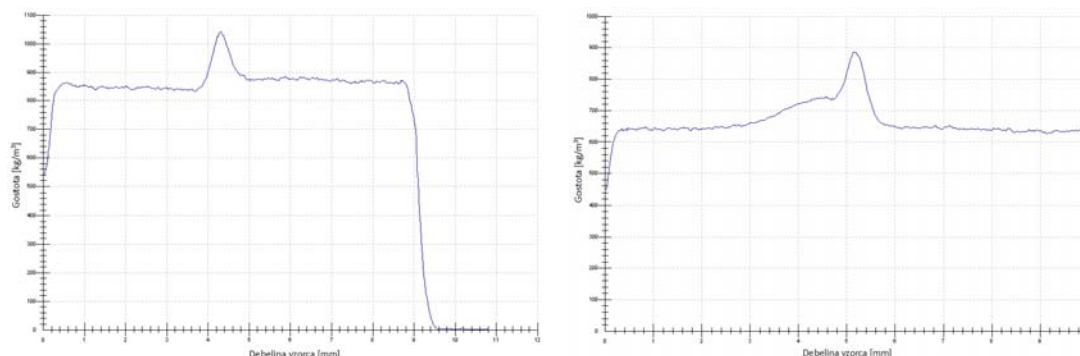
Iz primerjave izmerjenih gostotnih profilov je razvidno, da je imelo osnovno tkivo naravne bukovine v povprečju za približno 300 kg/m^3 višjo gostoto kot tkivo TM bukovine. Gostota materiala v sredini zvara je v primeru vzorca iz naravne bukovine znašala okoli 1080 kg/m^3 , pri vzorcu iz TM bukovine pa okoli 950 kg/m^3 (Slika 13).



Slika 13: Gostotna profila vzorcev varjene naravne in TM bukovine

4.1.2 Gostotna profila varjenega lesa, tretiranega z 10 % raztopino borove kisline

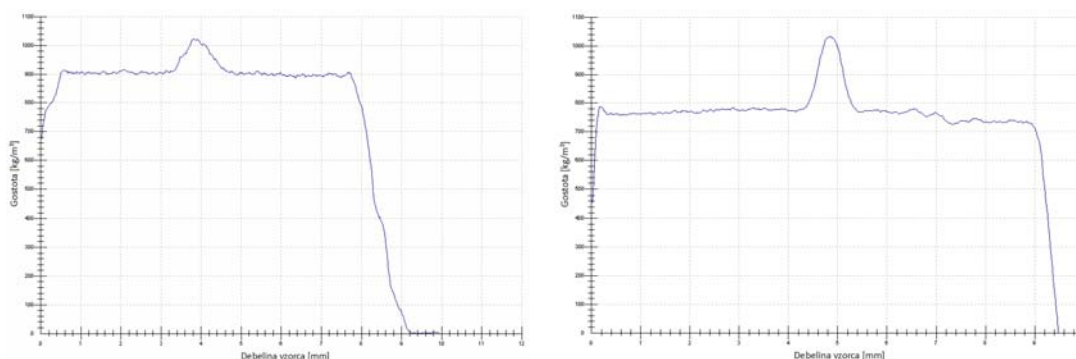
Iz primerjave izmerjenih gostotnih profilov je razvidno, da je imelo osnovno tkivo naravne bukovine v povprečju za približno 200 kg/m^3 višjo gostoto kot tkivo TM bukovine. Gostota materiala v sredini zvara je v primeru vzorca iz naravne bukovine znašala okoli 1040 kg/m^3 , pri vzorcu iz TM bukovine pa okoli 890 kg/m^3 (Slika 14).



Slika 14: Gostotna profila vzorcev varjene naravne in TM bukovine, tretirane z 10 % raztopino borove kisline

4.1.3 Gostotna profila varjenega lesa, tretiranega z 10 % raztopino citronske kisline

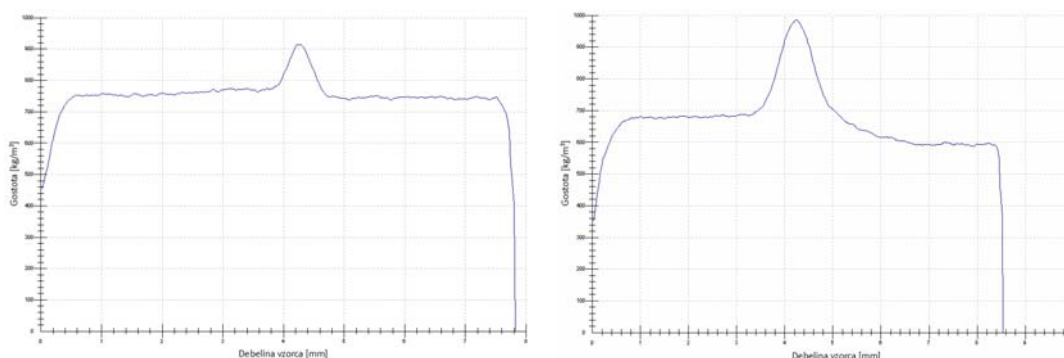
Iz primerjave izmerjenih gostotnih profilov je razvidno, da je imelo osnovno tkivo naravne bukovine v povprečju za približno 130 kg/m^3 višjo gostoto kot tkivo TM bukovine. Gostota materiala v sredini zvara je tako v primeru vzorca iz naravne, kot tudi vzorca iz TM bukovine znašala okoli 1040 kg/m^3 (Slika 15).



Slika 15: Gostotna profila vzorcev varjene naravne in TM bukovine, tretirane z 10 % raztopino citronske kisline

4.1.4 Gostotna profila varjenega lesa, tretiranega z 10 % raztopino očetne kisline

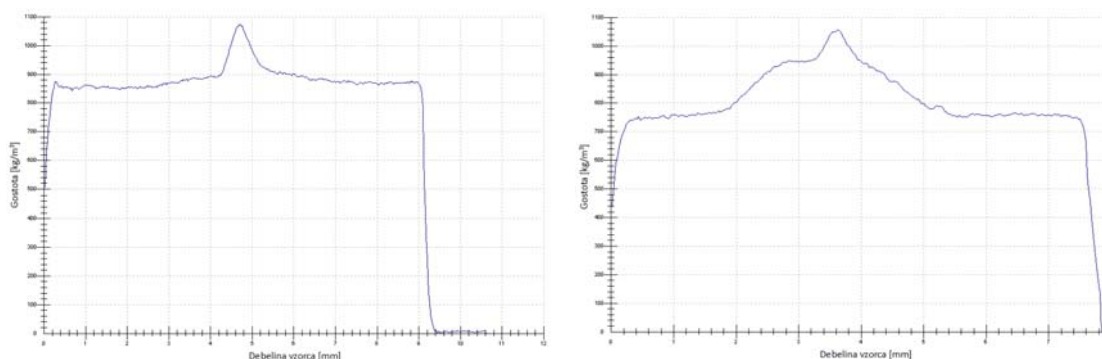
Iz primerjave izmerjenih gostotnih profilov je razvidno, da je imelo osnovno tkivo naravne bukovine v povprečju za približno 70 kg/m^3 višjo gostoto kot tkivo TM bukovine. Gostota materiala v sredini zvara je v primeru vzorca iz naravne bukovine znašala okoli 910 kg/m^3 , pri vzorcu iz TM bukovine pa okoli 980 kg/m^3 (Slika 16).



Slika 16: Gostotna profila vzorcev varjene naravne in TM bukovine, tretirane z 10 % raztopino očetne kisline

4.1.5 Gostotna profila varjenega lesa, vakuumsko impregniranega z 10 % raztopino citronske kisline

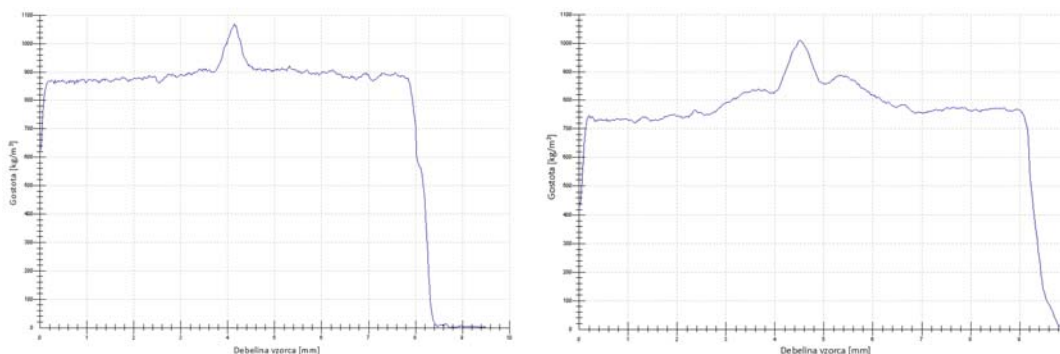
Iz primerjave izmerjenih gostotnih profilov je razvidno, da je imelo osnovno tkivo naravne bukovine v povprečju za približno 50 kg/m^3 višjo gostoto kot tkivo TM bukovine. Gostota materiala v sredini zvara je v primeru vzorca iz naravne bukovine znašala okoli 1080 kg/m^3 , pri vzorcu iz TM bukovine pa okoli 1050 kg/m^3 (Slika 17).



Slika 17: Gostotna profila vzorcev varjene naravne in TM bukovine, vakuumsko impregnirane z 10 % raztopino citronske kisline

4.1.6 Gostotna profila varjenega lesa, s povišano ravnovesno vlažnostjo

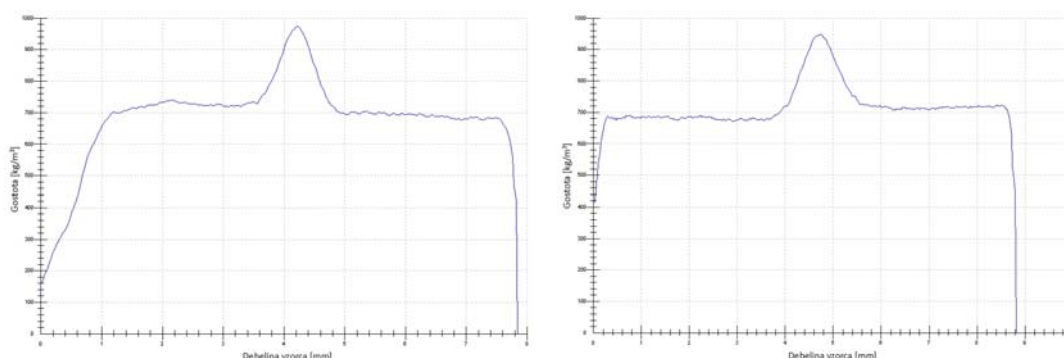
Iz primerjave izmerjenih gostotnih profilov je razvidno, da je imelo osnovno tkivo naravne bukovine v povprečju za približno 120 kg/m^3 višjo gostoto kot tkivo TM bukovine. Gostota materiala v sredini zvara je v primeru vzorca iz naravne bukovine znašala okoli 1070 kg/m^3 , pri vzorcu iz TM bukovine pa okoli 1010 kg/m^3 (Slika 18).



Slika 18: Gostotni profil vzorca varjene naravne in TM bukovine, s povišano ravnovesno vlažnostjo

4.1.7 Gostotna profila varjenega TM lesa, obdelanega z 20 % raztopino citronske kisline

Iz primerjave izmerjenih gostotnih profilov je razvidno, da je imelo osnovno lesno tkivo v obeh primerih gostoto v povprečju približno 700 kg/m^3 . Gostota materiala v sredini zvara je v primeru tretiranega vzorca znašala okoli 980 kg/m^3 , v vakuumsko impregniranem vzorcu pa okoli 950 kg/m^3 (Slika 19).



Slika 19: Gostotna profila vzorce varjene TM bukovine, tretirane oz. vakuumsko impregnirane z 20 % raztopino citronske kisline

Iz izmerjenih gostotnih profilov varjene naravne bukovine je razvidno, da je gostota lesa iz katerega smo pripravili vzorce, znašala približno med 750 in 850 kg/m^3 , v primeru vzorcev iz TM bukovine pa med približno 650 in 750 kg/m^3 .

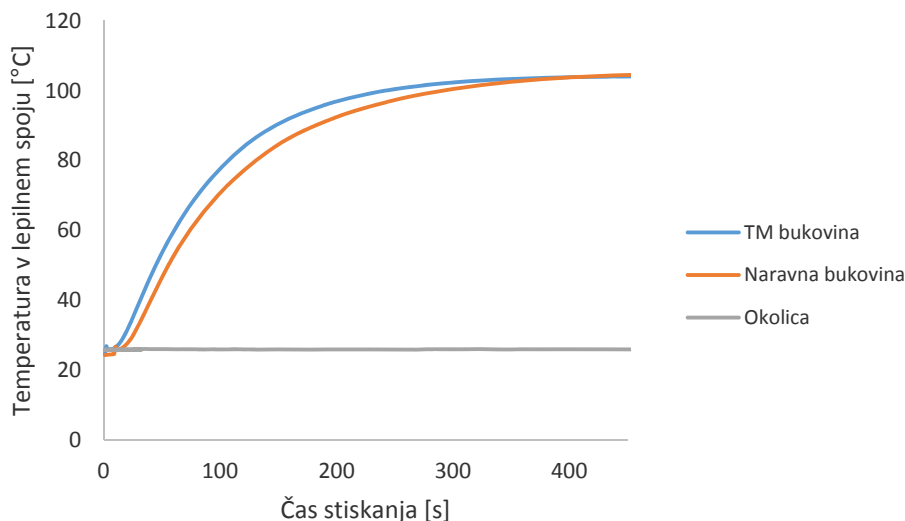
Iz primerjave vseh izmerjenih gostotnih profilov varjenega lesa je razvidno, da se lesu po postopku termične modifikacije njegova gostota zniža; v tem primeru za okoli 100 kg/m^3 oz. 12,5 %, kar so za primer bukovine ugotovili tudi drugi raziskovalci (Boonstra in sod., 2007).

Gostota varjenega lesa se s približevanjem od zunanosti k sredini spoja postopoma zvišuje. Občutnejše povečevanje gostote se tako prične v oddaljenosti približno 1,3 mm od sredine zvara. K povišanju gostote v ožjem območju okoli spoja je najverjetneje prispevala tudi tretacija oz. vakuumsko impregnacija lesa z raztopinami kislin, ki je ob enem povečala tudi vlažnost lesa na tem območju.

Gostota v sredini spoja je v nekaterih primerih v primerjavi z gostoto osnovnega materiala, višja tudi do 250 kg/m^3 in več. Dobljeni rezultati so v skladu z rezultati iz preteklih raziskav (Ganne-Chedeville in sod., 2006; Vaziri in sod., 2011a.).

4.2 SPREMLJANJE TEMPERATURE V UF LEPILNEM SPOJU

Pri lepljenju lesa naravne in TM bukovine z UF lepilom smo preko vstavljenega termočlena spremljali naraščanje temperature v lepilnem spoju med procesom stiskanja. Iz grafičnega prikaza je razvidno, da je temperatura v spoju v primeru lepljenja lamel iz TM bukovine naraščala nekoliko hitreje in prej dosegla temperaturo plošč stiskalnice, kljub njegovi slabši toplotni prevodnosti (Slika 20).



Slika 20: Diagram temperature v UF lepilnem spoju med lepljenjem v stiskalnici

4.3 STRIŽNA TRDNOST SPOJEV

Strižne teste zvarjenih in lepilnih spojev naravne in TM bukovine smo opravili na univerzalnem testnem stroju ZWICK/Z005 v skladu s standardom EN 205: 2003. Na osnovi maksimalne izmerjene sile loma smo z uporabo enačbe (1) izračunali strižno trdnost lepilnih spojev in vizualno ocenili delež loma po lesu na 25 % natančno.

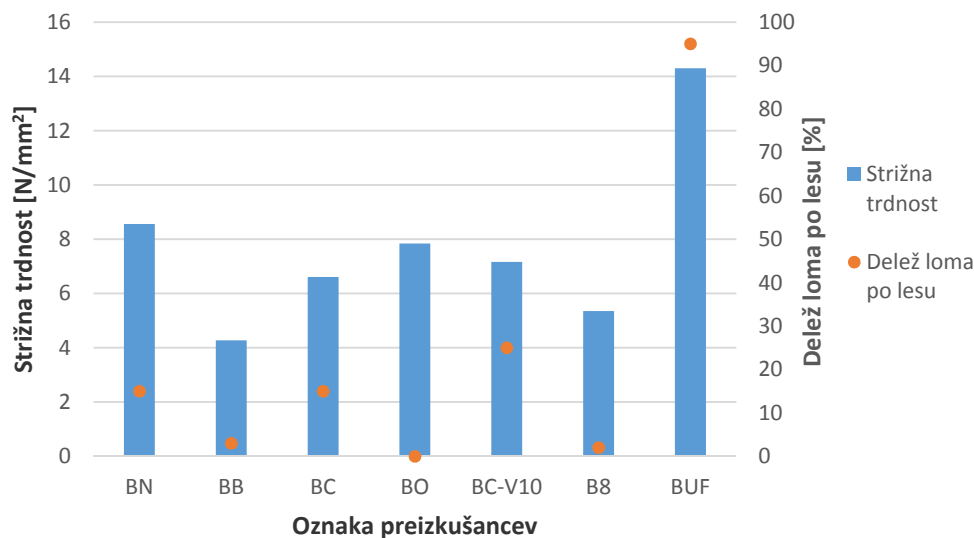
4.3.1 Strižna trdnost spojev pripravljenih po 1. načinu priprave

Iz povzetka rezultatov izmerjenih strižnih trdnosti varjenega lesa naravne bukovine je razvidno, da so najvišje vrednosti ob porušitvi dosegli spoji netretiranega lesa, najnižje pa spoji, pri katerih smo pred varjenjem v les vnesli raztopino borove kisline. Varjen les TM bukovine se je po opravljenem prvem načinu priprave izkazal za nekoliko boljšega, saj so izmerjene vrednosti strižne trdnosti in deleža loma po lesu višje.

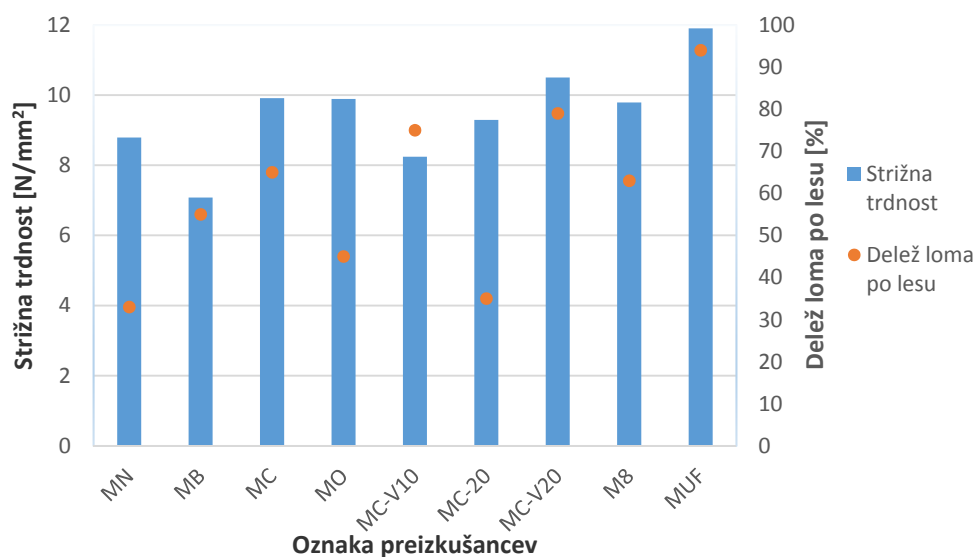
Povprečna vrednost strižnih trdnosti varjenih spojev po prvem načinu priprave je v primeru vzorcev iz naravne bukovine znašala $6,6 \text{ N/mm}^2$, vzorcev iz TM bukovine pa $9,2 \text{ N/mm}^2$. Glede na izmerjene vrednosti vzorcev iz različnih materialov, prisotnost kislin na stični površini lesa, ni bistveno vplivala na trdnost varjenih spojev. V nekaterih primerih je prisotnost kisline v območju spoja njegovo trdnost celo znižala, kar velja zlasti za borovo kislino. Prisotnost kristalov borove kisline med zvarjenima kosoma lesa je občutno poslabšala njuno kohezivnost. Bistvenih razlik glede na uporabljeno tehniko vnašanja raztopin tudi ni bilo zaznati. Spoji formirani z UF lepilom so dosegli občutno višje vrednosti od varjenih spojev (Preglednica 5; Sliki 21 in 22).

Preglednica 5: Strižna trdnost spoja in delež loma po lesu za preizkušance testirane po 1. načinu priprave

VRSTA MATERIALA	NAČIN SPAJANJA VZORCEV	KLIMATSKI POGOJI SHRANJEVANJA	UPORABLJENA KISLINA	NAČIN TRETIRANJA	OZNAKA VZORCEV	ŠT. VZORCEV	STRIŽNA TRDNOST $[\text{N/mm}^2]$	DELEŽ LOMA PO LESU [%]
BUKOVINA	Varjenje lesa	20 °C / 65 %	/	Netretirano	BN	10	8,6	15
		20 °C / 65 %	10 % raz. bor. k.	Premazovanje	BB	10	4,3	3
		20 °C / 65 %	10 % raz. cit. k.	Premazovanje	BC	10	6,6	15
		20 °C / 65 %	10 % raz. oce. k.	Premazovanje	BO	10	7,8	0
		20 °C / 65 %	10 % raz. cit. k.	Vak. impregnacija	BC-V10	3	7,2	25
		20 °C / 85 %	/	Netretirano	B8	10	5,4	2
	Lepljenje z UF lepilom	20 °C / 65 %	/	Premazovanje	BUF	10	14,3	95
		20 °C / 65 %	/	Netretirano	MN	10	8,8	33
TM BUKOVINA	Varjenje lesa	20 °C / 65 %	10 % raz. bor. k.	Premazovanje	MB	10	7,1	55
		20 °C / 65 %	10 % raz. cit. k.	Premazovanje	MC	10	9,9	65
		20 °C / 65 %	10 % raz. oce. k.	Premazovanje	MO	10	9,9	45
		20 °C / 65 %	10 % raz. cit. k.	Vak. impregnacija	MC-V10	3	8,2	75
		20 °C / 65 %	20 % raz. cit. k.	Premazovanje	MC-20	10	9,3	35
		20 °C / 65 %	20 % raz. cit. k.	Vak. impregnacija	MC-V20	6	10,5	79
		20 °C / 85 %	/	Netretirano	M8	10	9,8	63
	Lepljenje z UF lepilom	20 °C / 65 %	/	Premazovanje	MUF	10	11,9	94



Slika 21: Strižna trdnost spoja in delež loma po lesu preizkušancev iz naravne bukovine po 1. načinu priprave



Slika 22: Strižna trdnost spoja in delež loma po lesu preizkušancev iz TM bukovine po 1. načinu priprave

4.3.2 Strižna trdnost spojev pripravljenih po 2. načinu priprave

Iz povzetka rezultatov izmerjenih strižnih trdnosti varjenega lesa naravne bukovine je razvidno, da so najvišje vrednosti ob porušitvi dosegli spoji lesa, tretiranega s citronsko oz. očetno kislino, najnižje pa zopet spoji, pri katerih smo pred varjenjem v les vnesli raztopino borove kisline.

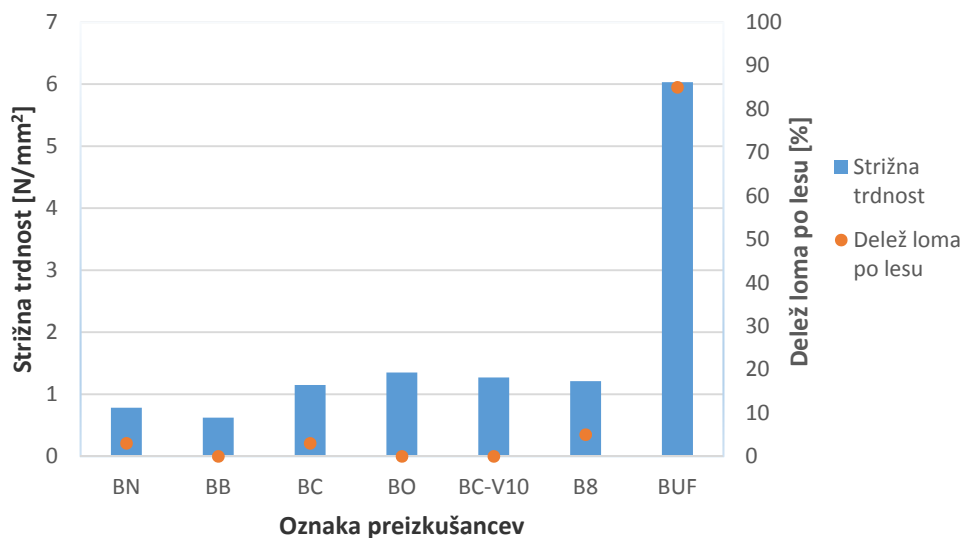
Varjen les TM bukovine se je po opravljenem drugem načinu priprave ponovno izkazal za nekoliko boljšega, saj so izmerjene vrednosti strižne trdnosti in deleža loma po lesu še vedno višje.

Povprečna vrednost strižnih trdnosti varjenih spojev po drugem načinu priprave je v primeru vzorcev iz naravne bukovine znašala $1,1 \text{ N/mm}^2$, vzorcev iz TM bukovine pa $2,5 \text{ N/mm}^2$. Povišana vlažnost tako zelo vpliva na trdnost varjenega lesa. Prisotnost kislin v območju zvarov ni bistveno preprečila vdiranja in vezave vode med zvarjena kosa lesa.

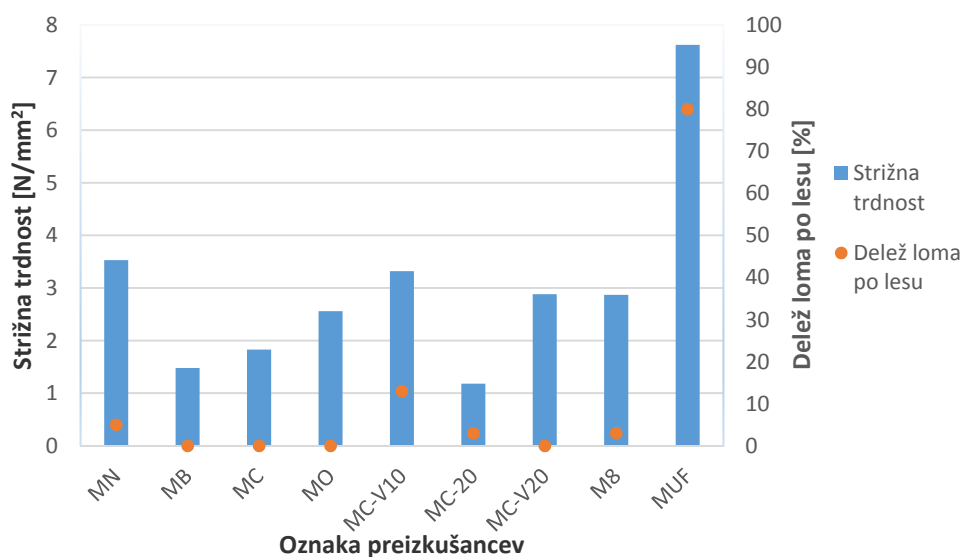
Namakanje vzorcev lesa v hladni vodi je vplivalo tudi na zlepljene vzorce lesa, saj se je trdnost njihovih spojev, glede na vzorce iz prvega načina priprave, preplopolovila (Preglednica 6; Sliki 23 in 24).

Preglednica 6: Strižna trdnost spoja in delež loma po lesu za preizkušance testirane po 2. načinu priprave

VRSTA MATERIALA	NAČIN SPAJANJA VZORCEV	KLIMATSKI POGOJI SHRANJEVANJA	UPORABLJENA KISLINA	NAČIN TRETIRANJA	OZNAKA VZORCEV	ŠT. VZORCEV	STRIŽNA TRDNOST $[\text{N/mm}^2]$	DELEŽ LOMA PO LESU [%]
BUKOVINA	Varjenje lesa	20 °C / 65 %	/	Netretirano	BN	10	0,8	3
		20 °C / 65 %	10 % raz. bor. k.	Premazovanje	BB	10	0,6	0
		20 °C / 65 %	10 % raz. cit. k.	Premazovanje	BC	10	1,2	3
		20 °C / 65 %	10 % raz. oce. k.	Premazovanje	BO	10	1,4	0
		20 °C / 65 %	10 % raz. cit. k.	Vak. impregnacija	BC-V10	2	1,3	0
		20 °C / 85 %	/	Netretirano	B8	10	1,2	5
	Lepljenje z UF lepilom	20 °C / 65 %	/	Premazovanje	BUF	10	6,0	85
TM BUKOVINA	Varjenje lesa	20 °C / 65 %	/	Netretirano	MN	10	3,5	5
		20 °C / 65 %	10 % raz. bor. k.	Premazovanje	MB	9	1,5	0
		20 °C / 65 %	10 % raz. cit. k.	Premazovanje	MC	9	1,8	0
		20 °C / 65 %	10 % raz. oce. k.	Premazovanje	MO	10	2,6	0
		20 °C / 65 %	10 % raz. cit. k.	Vak. impregnacija	MC-V10	2	3,3	13
		20 °C / 65 %	20 % raz. cit. k.	Premazovanje	MC-20	10	1,2	3
		20 °C / 65 %	20 % raz. cit. k.	Vak. impregnacija	MC-V20	3	2,9	0
		20 °C / 85 %	/	Netretirano	M8	10	2,9	3
	Lepljenje z UF lepilom	20 °C / 65 %	/	Premazovanje	MUF	10	7,6	80



Slika 23: Strižna trdnost spoja in delež loma po lesu preizkušancev iz naravne bukovine po 2. načinu priprave



Slika 24: Strižna trdnost spoja in delež loma po lesu preizkušancev iz TM bukovine po 2. načinu priprave

Po opravljenih testih strižne trdnosti varjenih spojev je bilo v sredini preostalega zvara moč opaziti suha območja. Iz tega lahko sklepamo, da je voda kljub 24 urnemu namakanju v hladni vodi, prodrla nekaj milimetrov v zunanji predel spoja, v sredini pa je ostalo suho območje (Slika 25).



Slika 25: Izgled zvarjenega spoja po 24 urnem namakanju v hladni vodi (Označeno je suho območje spoja)

Navlaževanje in vdiranje vode je tako potekalo iz zunanosti proti središču spojev. Na prečnem prerezu preizkušancev sta se obe med seboj povezani polovici začeli zvijati navzven, s čimer je voda iz okolice v preseku prodirala v sredino spojev.

4.3.3 Strižna trdnost spojev pripravljenih po 3. načinu priprave

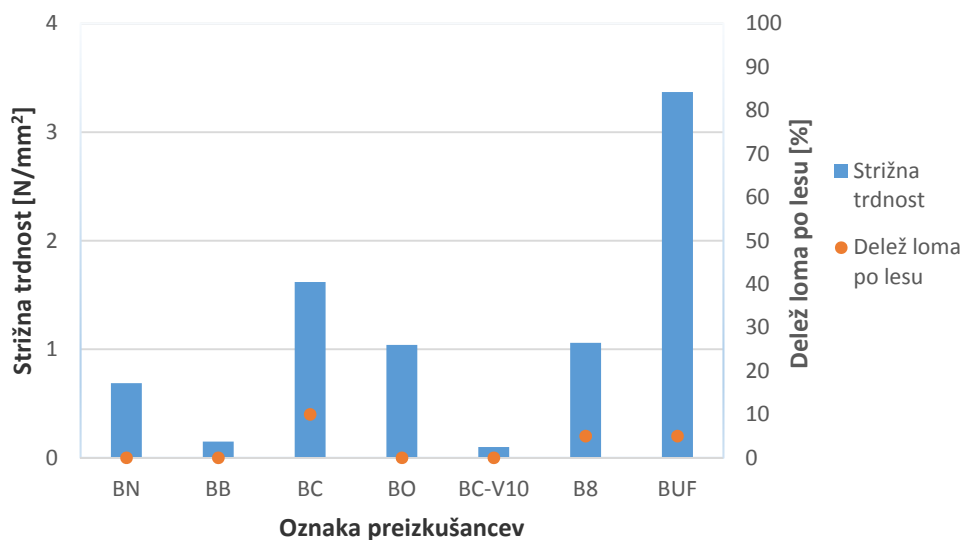
Iz povzetka rezultatov izmerjenih strižnih trdnosti varjene naravne bukovine je razvidno, da so najvišje vrednosti ob poružitvi dosegli spoji lesa, tretiranega s citronsko kislino, najnižje pa spoji, pri katerih smo pred varjenjem v les z vakuumsko impregnacijo vnesli 10 % raztopino citronske kisline.

Varjen les TM bukovine se je po opravljenem tretjem načinu priprave sicer zopet izkazal za nekoliko boljšega, vendar izmerjene vrednosti strižne trdnosti in deleža loma niso več drastično višje.

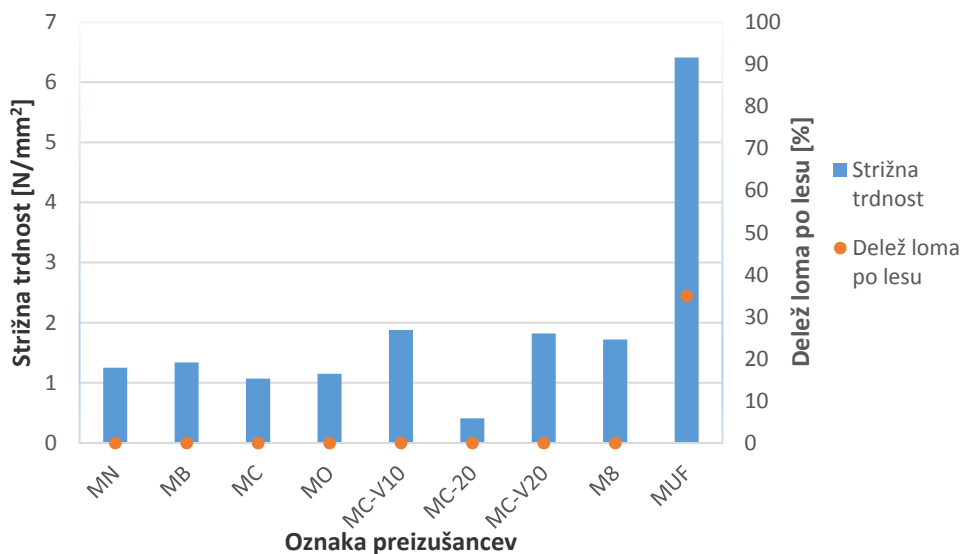
Povprečna vrednost strižnih trdnosti varjenih spojev po tretjem načinu priprave je v primeru vzorcev iz naravne bukovine znašala $0,8 \text{ N/mm}^2$, vzorcev iz TM bukovine pa $1,3 \text{ N/mm}^2$ (Preglednica 7; Sliki 26 in 27).

Preglednica 7: Strižna trdnost spoja in delež loma po lesu za preizkušance testirane po 3. načinu priprave

VRSTA MATERIALA	NAČIN SPAJANJA VZORCEV	KLIMATSKI POGOJI SHRANJEVANJA	UPORABLJENA KISLINA	NAČIN TRETIRANJA	OZNAKA VZORCEV	ŠT. VZORCEV	STRIŽNA TRDNOST [N/mm ²]	DELEŽ LOMA PO LESU [%]
BUKOVINA	Varjenje lesa	20 °C / 65 %	/	Netretirano	BN	10	0,7	0
		20 °C / 65 %	10 % raz. bor. k.	Premazovanje	BB	10	0,2	0
		20 °C / 65 %	10 % raz. cit. k.	Premazovanje	BC	10	1,6	10
		20 °C / 65 %	10 % raz. oce. k.	Premazovanje	BO	10	1,0	0
		20 °C / 65 %	10 % raz. cit. k.	Vak. impregnacija	BC-V10	2	0,1	0
		20 °C / 85 %	/	Netretirano	B8	10	1,1	5
	Lepljenje z UF lepilom	20 °C / 65 %	/	Premazovanje	BUF	10	3,4	5
TM BUKOVINA	Varjenje lesa	20 °C / 65 %	/	Netretirano	MN	10	1,3	0
		20 °C / 65 %	10 % raz. bor. k.	Premazovanje	MB	10	1,3	0
		20 °C / 65 %	10 % raz. cit. k.	Premazovanje	MC	10	1,1	0
		20 °C / 65 %	10 % raz. oce. k.	Premazovanje	MO	10	1,2	0
		20 °C / 65 %	10 % raz. cit. k.	Vak. impregnacija	MC-V10	2	1,9	0
		20 °C / 65 %	20 % raz. cit. k.	Premazovanje	MC-20	10	0,4	0
		20 °C / 65 %	20 % raz. cit. k.	Vak. impregnacija	MC-V20	4	1,8	0
	Lepljenje z UF lepilom	20 °C / 85 %	/	Netretirano	M8	10	1,7	0
		20 °C / 65 %	/	Premazovanje	MUF	10	6,4	35



Slika 26: Strižna trdnost spoja in delež loma po lesu preizkušancev iz naravne bukovine po 3. načinu priprave



Slika 27: Strižna trdnost spoja in delež loma po lesu preizkušancev iz TM bukovine po 3. načinu priprave

Namakanje vzorcev lesa v topli in kasnejše ohlajanje v hladni vodi je še bolj vplivalo tudi na zlepljene vzorce lesa, saj se je trdnost njihovih spojev, glede na vzorce iz drugega načina priprave, ponovno znižala. To velja predvsem za zlepljene vzorce lesa iz naravne bukovine, medtem, ko so zlepljeni vzorci iz TM bukovine še vedno dosegali dokaj visoke vrednosti strižne trdnosti. K temu je očitno pripomogla termična modifikacija lesa, ki je lesu znižala dovzetnost za vezavo vode.

4.3.4 Strižna trdnost spojev pripravljenih po 4. načinu priprave

Natezno-strižna trdnost vseh preizkušancev, ki so bili izpostavljeni 7 dnevni klimatizaciji v standardni klimi, 3 urnem namakanju v vreli vodi in nadaljnji 2 urni ohladitvi v vodi s temperaturo 20 °C, je bila enaka 0.

Narejeni preizkušanci zvarjenih vzorcev in vzorcev zlepljenih z UF lepilom so že po zaključku 3 urnega kuhanja v vreli vodi po večini razpadli. Na območju izrezanega preklopa spojev na sredini preizkušancev je v vseh primerih prišlo do porušitve zvara oz. lepilnega spoja. V primeru nekaterih preizkušancev z varjenimi spoji naravne in TM bukovine pa je bilo v preostalem območju spojev opaziti še vedno neko minimalno povezanost (Slika 28). Kljub temu, da trdnosti, zaradi porušitve spojev na območju preklopa ni bilo mogoče več izmeriti, so tako preizkušanci ostali delno povezani.



Slika 28: Izgled zvarjenih spojev po 3 urnem kuhanju v vreli vodi in 2 urnem namakanju v hladni vodi

Iz opazovanj preizkušancev, pripravljenih po tem načinu priprave lahko torej sklepamo, da je odpornost zvarjenih spojev proti vdoru vlažnosti v sredino spoja v veliki meri odvisna od velikosti kontaktne površine. Večja kot je velikost površine med dvema zvarjenima kosoma lesa, počasneje in težje poteka navlaževanje od zunanosti proti središču zvara.

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

Eksperimentalni del magistrskega dela je temeljil na možnostih izboljšanja strižne trdnosti linearno varjenega lesa in odpornosti spojev na povišano vlažnost. Namen raziskave je bil razviti postopek spajanja lesa, za katerega ne uporabimo nobenih sintetičnih lepilnih sredstev, ki so pridobljena iz fosilnih goriv (nafte).

Zaradi razširjenosti uporabe za izdelavo različnih vrst izdelkov, smo se odločili, da v raziskavi uporabimo naravno in termično modificirano bukovino, za katero je, v primerjavi z naravnim lesom, značilna manjša dovzetnost za navlaževanje in posledično večja dimenzijska stabilnost.

Obdelava lesa v atmosferi z visoko temperaturo, ob odsotnosti atmosferskega kisika vpliva na njegovo vlažnost, ki jo doseže v določenih klimatskih pogojih. Termično modificiran les je v primerjavi z naravnim bukovim lesom dosegal približno za polovico nižjo ravnovesno vlažnost.

Uporabljeno naravno in termično modificirano bukovino smo zvarili s postopkom linearnega tornega varjenja, trdnost spojev in njihovo odpornost na povišano relativno zračno vlažnost pa smo poskušali izboljšati z vnašanjem raztopin različnih kislin na kontaktne površine varjenega lesa. V ta namen smo uporabili 10 % vodne raztopine borove, citronske in očetne kisline. Na podlagi preteklih raziskav smo se osredotočili predvsem na uporabo očetne kisline, zato smo v nekaj vzorcev vnesli tudi 20 % raztopino slednje. Raztopine izbranih kislin smo v površino lesa vnašali s premazovanjem, določen del pa tudi s tehniko vakuumske impregnacije.

V primeru varjenja lesa, predhodno tretiranega z 10 % borovo kislino, je bilo število vzorcev, ki so razpadli pred nadaljnjim testiranjem, največje. Razlog je bil najverjetneje ta, da so kristali borove kisline po nanašanju raztopine ostali na premazani površini. Prisotnost kristalov je pri postopku varjenja ustvarila dodatno trenje med površinama vzorcev, zaradi česar je bilo moč zaznati tudi več dima. To je nadalje vplivalo tudi na ostale lastnosti teh spojev. Kristali, ujeti med dve med seboj varjeni ploskvi, so namreč preprečili nastanek homogenega varjenega spoja; med varjenima ploskvama je bila kohezivnost posledično slabša.

Po premazovanju TM bukovine z 20 % raztopino citronske kisline se je na premazani površini ustvaril film nanese kisline. Površina se je tako sušila zelo počasi in je dalj časa ostala lepljiva na otip.

Za primerjavo trdnosti lastnosti smo dve seriji vzorcev spojili z urea-formaldehidnim lepilom, ki sicer velja za pogosto uporabljeno nekonstrukcijsko lepilo.

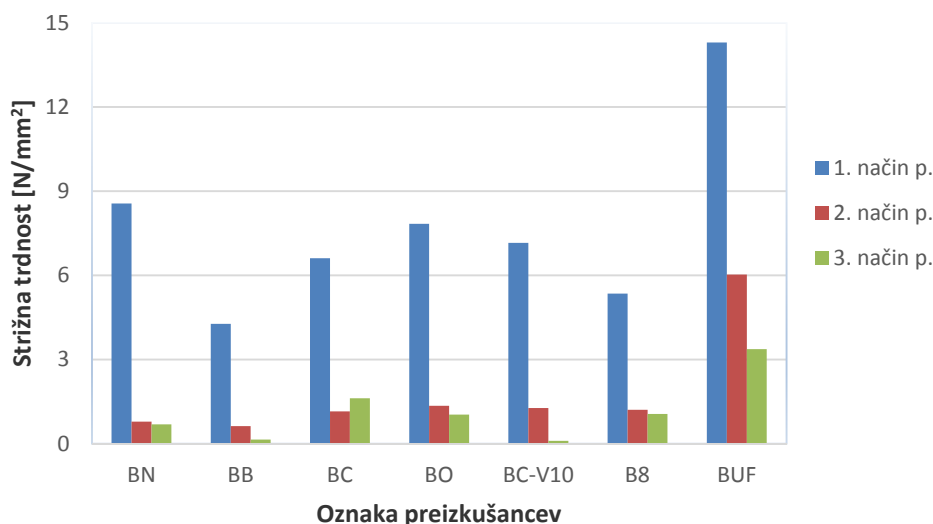
V nadaljevanju smo vzorcem varjenega lesa z uporabo tehnike presevanja z X – žarki izmerili tudi gostotne profile v območju v bližini spojev. Izkazalo se je, da pri postopku varjenja lesa pride do zgostitve lesa v območju spoja; gostota lesa se je v nekaterih primerih povečala tudi za 35 % in več, na kar je poleg uporabljenih parametrov pri postopku varjenja najverjetneje vplivala tudi prisotnost kislin v materialu oz. povišana vlažnost lesa. Za ocenitev vpliva tovrstnega parametra bi bilo potrebno pripraviti in izmeriti večje število vzorcev, opraviti podrobnejše analize oz. uporabiti natančnejšo metodo za merjenje gostote materiala.

Iz vzorcev varjenega in zlepljenega lesa smo zatem pripravili preizkušance v skladu z evropskim standardom, ki spojen les razvršča na podlagi vrednosti izmerjenih strižnih trdnosti, po opravljeni posamezni stopnji enega od štirih različnih načinov priprav. Po opravljenem postopku posameznega načina priprave smo preizkušancem ugotovili strižno trdnost spojev.

Po vsakem opravljenem načinu priprave je strižna trdnost spojev upadla. Najvišji padec strižne trdnosti je zaznati pri primerjavi strižne trdnosti po prvem in drugem načinu priprave (NP); v primeru varjenih vzorcev je prisotnost vode zelo vplivala na njihovo trdnost (Preglednica 8; Sliki 29 in 30).

Preglednica 8: Primerjava izmerjenih strižnih trdnosti preizkušancev iz naravne in TM bukovine

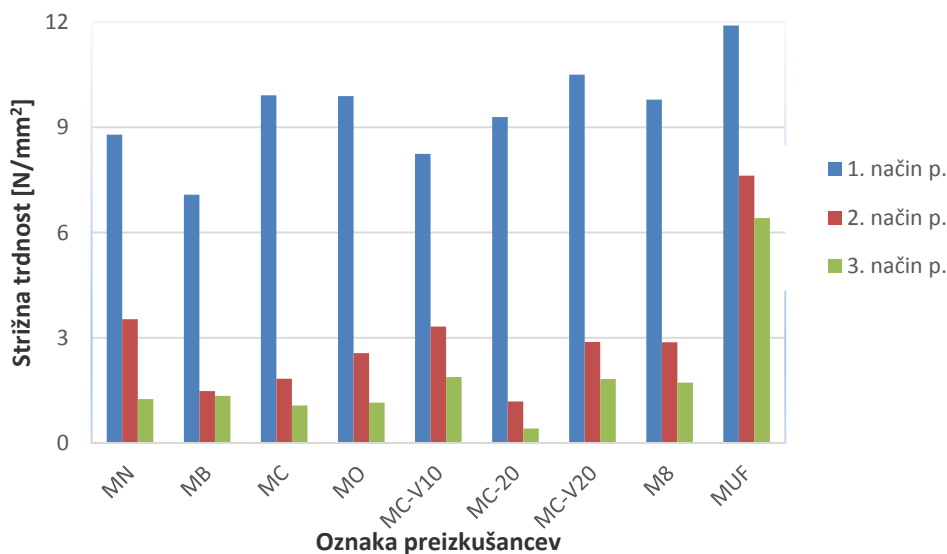
VRSTA MATERIALA	NAČIN SPAJANJA VZORCEV	VLAŽNOST LESA [%]	UPORABLJENA KISLINA	NAČIN TRETIRANJA	OZNAKA VZORCEV	STRIŽNA TRDNOST [N/mm ²]		
						1. NP	2. NP	3. NP
BUKOVINA	Varjenje lesa	10,1	/	Netretirano	BN	8,6	0,8	0,7
		10,1	10 % raz. bor. k.	Premazovanje	BB	4,3	0,6	0,2
		10,1	10 % raz. cit. k.	Premazovanje	BC	6,6	1,2	1,6
		10,1	10 % raz. oce. k.	Premazovanje	BO	7,8	1,4	1,0
		10,1	10 % raz. cit. k.	Vak. impregnacija	BC-V10	7,2	1,3	0,1
		12,9	/	Netretirano	B8	5,4	1,2	1,1
	Lepljenje z UF lepilom	10,1	/	Premazovanje	BUF	14,3	6,0	3,4
TM BUKOVINA	Varjenje lesa	4,2	/	Netretirano	MN	8,8	3,5	1,3
		4,2	10 % raz. bor. k.	Premazovanje	MB	7,1	1,5	1,3
		4,2	10 % raz. cit. k.	Premazovanje	MC	9,9	1,8	1,1
		4,2	10 % raz. oce. k.	Premazovanje	MO	9,9	2,6	1,2
		4,2	10 % raz. cit. k.	Vak. impregnacija	MC-V10	8,2	3,3	1,9
		4,2	20 % raz. cit. k.	Premazovanje	MC-20	9,3	1,2	0,4
		4,2	20 % raz. cit. k.	Vak. impregnacija	MC-V20	10,5	2,9	1,8
		8,7	/	Netretirano	M8	9,8	2,9	1,7
	Lepljenje z UF lepilom	4,2	/	Premazovanje	MUF	11,9	7,6	6,4



Slika 29: Primerjava strižne trdnosti preizkušancev iz naravne bukovine, po posameznem načinu priprave

Vnos različnih raztopin različnih kislin v naravno bukovino ni bistveno izboljšal strižne trdnosti spojev in odpornosti na povišano vlažnost. Od uporabljenih kislin se je sicer v suhih pogojih uporabe za najboljše izkazalo tretiranje površine lesa z raztopino očetne kisline, medtem, ko v pogojih s povišano vlažnostjo, nobena od kislin posebej ne izstopa.

V primerjavi z lepljenimi preizkušanci, so varjeni preizkušanci iz lesa bukke dosegali polovične vrednosti strižnih trdnosti, tudi po izpostavitvi povišani vlažnosti.



Slika 30: Primerjava strižne trdnosti preizkušancev iz TM bukovine, po posameznem načinu priprave

Vnos različnih raztopin različnih kislin v termično modificirano bukovino ni bistveno izboljšal strižne trdnosti vzorcev in odpornosti na povišano vlažnost. Od uporabljenih kislin se je sicer v suhih pogojih uporabe za najboljše izkazalo vakuumsko impregniranje z raztopino citronske kisline, ki malenkost izstopa tudi v pogojih s povišano vlažnostjo.

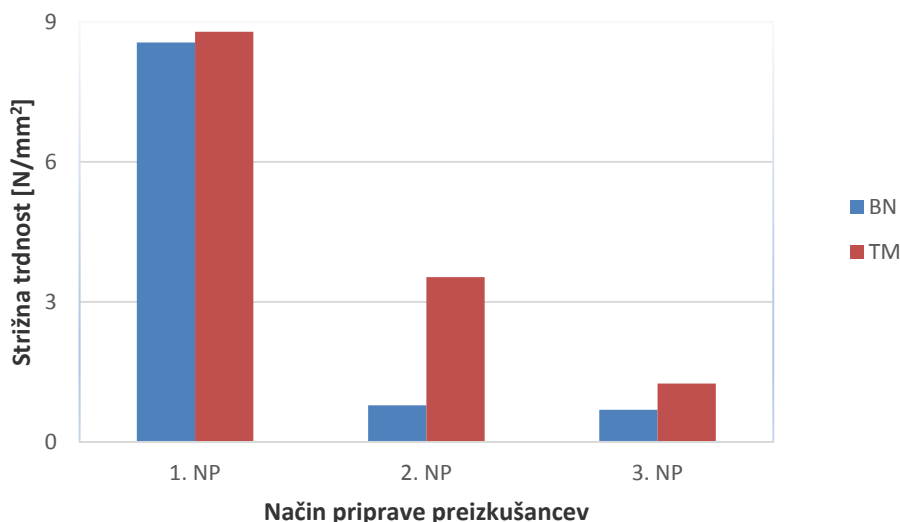
V primerjavi z varjenimi preizkušanci, so zlepljeni preizkušanci iz lesa termično modificirane bukovine dosegali višje vrednosti strižnih trdnosti, tudi po izpostavitvi povišani vlažnosti.

5.1.1 Primerjava strižne trdnosti varjenih preizkušancev iz naravne in TM bukovine

Višjo strižno trdnost so v povprečju izkazovali zvarjeni preizkušanci iz termično modificirane bukovine (TM) od preizkušancev iz naravne bukovine (BN) in to po vseh treh načinih priprave (Slika 31).

V suhih pogojih uporabe so vrednosti strižnih trdnosti dokaj podobne, kar je sicer v manjšem nasprotju z dosedanjimi ugotovitvami, kjer so izmerili občutno nižje trdnosti varjenega termično modificiranega lesa v primerjavi z naravnim lesom (Boonstra in sod., 2006).

Ob povišani vlažnosti pa je opaziti, da je ta manj vplivala na termično modificirano bukovino, iz česar lahko sklepamo in potrdimo dejstvo, da termična modifikacija vidno zmanjša dovzetnost lesa za vezavo vode iz okolice in to tudi v primeru, ko za spajanje uporabimo tehniko linearnega tornega varjenja.



Slika 31: Primerjava strižne trdnosti preizkušancev iz varjene netretirane naravne in TM bukovine, po posameznem načinu priprave

Glede na povprečne vrednosti strižnih trdnosti spojev tako v primeru varjene naravne, kot tudi termično modificirane bukovine, tako spojenega lesa ne moremo uvrstiti niti v trajnostni razred C1 standarda SIST EN 12765, saj izmerjena trdnost ni bila večja ali enaka 10 N/mm^2 .

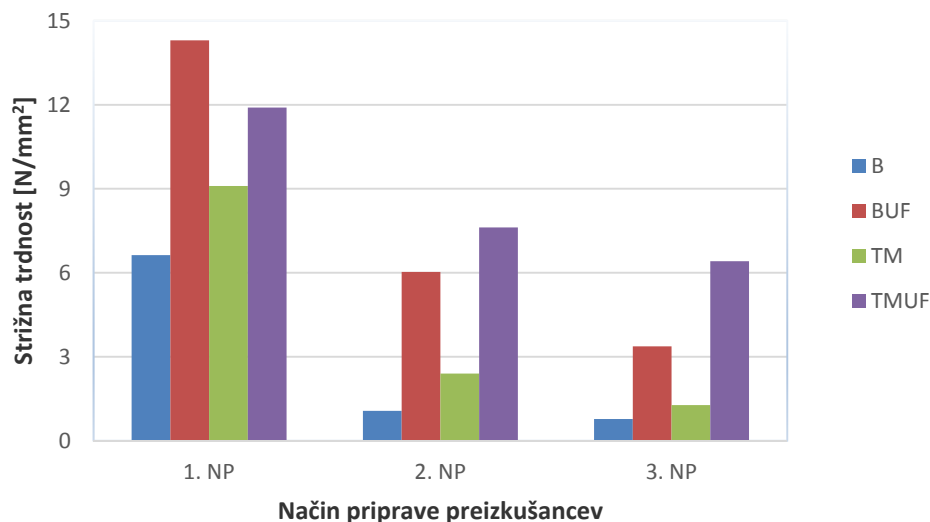
5.1.2 Primerjava strižne trdnosti varjenih in zlepljenih preizkušancev

Ob uporabi različnih materialov se je v obeh primerih lepljenje lesa z UF lepilom izkazalo za učinkovitejšo tehniko spajanja, tako v suhih pogojih kot tudi v pogojih s povišano vlažnostjo lesa. Varjeni spoji so sicer v suhih pogojih izkazovali določeno trdnost, ki omogoča izdelavo spojev za pohištvene namene, vendar pa vrednosti niso dosegale standardnih zahtev.

V Preglednici 9 in na Sliki 32 je prikazana primerjava strižnih trdnosti varjenih preizkušancev iz naravne (B) in termično modificirane bukovine (TM) ter preizkušancev zlepljenih z UF lepilom iz naravne (BUF) in termično modificirane bukovine (TMUF).

Preglednica 9: Primerjava strižnih trdnosti varjenih preizkušancev in preizkušancev zlepljenih z UF lepilom

VRSTA MATERIALA	NAČIN SPAJANJA VZORCEV	OZNAKA VZORCEV	STRIŽNA TRDNOST [N/mm ²]		
			1. NP	2. NP	3. NP
BUKOVINA	Varjenje lesa	B	6,6	1,1	0,8
	Lepljenje z UF lepilom	BUF	14,3	6,0	3,4
TM BUKOVINA	Varjenje lesa	TM	9,1	2,4	1,3
	Lepljenje z UF lepilom	TMUF	11,9	7,6	6,4



Slika 32: Primerjava strižne trdnosti varjenih preizkušancev in preizkušancev zlepljenih z UF lepilom, po posameznem načinu priprave

5.2 SKLEPI

V magistrskem delu smo primerjali strižno trdnost linearno varjenega spoja bukovine in urea-formaldehidnega spoja. Naravno in termično modificirano bukovino smo zlepili z urea-formaldehidnim lepilom in zvarili s postopkom linearne tornega varjenja. Pred varjenjem lesa smo vanj vnesli tudi vodne raztopine borove, citronske in očetne kisline. Vzorcem zvarjenega lesa smo izmerili gostoto po preseku. Zvarjene in zlepljene vzorce lesa smo pripravili v skladu s standardom SIST EN 12765 in ugotovili strižno trdnost spojev.

Na osnovi rezultatov opravljene raziskave lahko zapišemo naslednje sklepe:

- Termična modifikacija bukovine zmanjša ravnovesno vlažnost lesa.
- Pri postopku varjenja lesa pride do zgostitve lesa v območju spoja.
- Zvarjena termično modificirana bukovina je manj dovzetna za navlaževanje kot naravna bukovina in po vseh treh načinih priprave izkazuje boljšo trdnost spoja.
- Vnos različnih raztopin kislin v les bistveno ne izboljša trdnosti varjenih spojev in njihove odpornosti na povišano vlažnost.
- Tehniko linearne tornega varjenja lahko uporabimo za spajanje naravne kot tudi termično modificirane bukovine, vendar so spoji primerni za manj zahtevne načine uporabe v suhih prostorih.

- Varjeni spoji tako naravne kot termično modificirane bukovine po trdnosti ne dosegajo zahtev standarda SIST EN 12765.
- Urea-formaldehidni lepilni spoji imajo višjo strižno trdnost od linearno torni zvarjenih spojev lesa.

Rezultati raziskave so nam pokazali, da je spajanje lesa z urea-formaldehidnim lepilom učinkovitejše od spajanja z linearnim tornim varjenjem. Z vnosom raztopin različnih naravnih kislin ne moramo izboljšati trdnosti varjenih spojev in njihove odpornosti na povišano vlažnost.

V nadaljevanju raziskav bi bilo smiselno pred postopkom varjenja predhodno v les vnesti raztopine kislin z višjo koncentracijo ali uporabiti drugačne parametre pri varjenju.

6 POVZETEK

Les velja za najbolj uporabljen naravni material, ki ga izkoriščamo za izdelavo različnih izdelkov, tako v notranjih kot zunanjih prostorih, kjer pa se pogostokrat srečamo z njegovo slabšo odpornostjo na povišano vlažnost. Les moramo velikokrat tudi zlepiti. Z razvojem kemične industrije je poleg lepil iz naravnih snovi, v prvi polovici 20. stoletja prišlo tudi do razvoja sintetičnih lepil, ki so pridobljena iz nafte in njenih derivatov.

V prizadevanjih najti nadomesten, naravi bolj prijazen način spajanja lesa, se je za uspešno izkazala tudi tehnika t.i. varjenja lesa. Največja pomanjkljivost tako spojenega lesa je neodpornost spojev v pogojih s povišano vlažnostjo.

V ta namen smo to slabost poskusili izboljšati s termično in kemično modifikacijo lesa, pred postopkom njegovega varjenja. Les bukve (*Fagus sylvatica* L.) smo kemično modificirali z vnosom 10 oz. 20 % vodnimi raztopinami borove, citronske in očetne kisline, ki smo jih v material vnesli s premazovanjem oz. vakuumsko impregnacijo. Termično modifikacijo lesa smo izvedli v vakuumski atmosferi pri temperaturi 210 °C.

Za primerjavo lastnosti varjenih in zlepljenih spojev, smo nekaj lesa zlepili tudi z urea-formaldehidnim (UF) lepilom, ki je pogostokrat uporabljeno lepilo za izdelavo različnih vrst izdelkov.

Varjenim vzorcem smo s presevanjem z X - žarki izmerili porazdelitev gostote po preseku.

Lastnosti spojev smo primerjali na osnovi njihovih natezno-strižnih trdnosti. Vzorce spojenega lesa smo pred strižnim testom pripravili v skladu z evropskim standardom SIST EN 12765, v katerem so opisani štirje načini priprave vzorcev. Načini priprave se stopnjujejo glede na njihovo drastičnost oz. zahtevnost pogojev, s katerimi izpostavimo vzorce povišani vlažnosti.

Ugotovili smo, da je postopek termične modifikacije bukovine zmanjšal njeno ravnovesno vlažnost oz. možnost vezave vode v les. Aplikacija tlaka prečno in posledično nastanek sile trenja na površini lesa pri varjenju povzroči zgostitev lesa, ki je najvišja v sredini zvara. Vnos različnih raztopin kislin v les, ne glede na način vnosa, bistveno ni izboljšal trdnosti varjenih spojev in njihove odpornosti na povišano vlažnost.

Glede na meritve natezno-strižnih trdnosti varjeni spoji lesa, tudi po pripravi v skladu s prvo stopnjo standarda SIST EN 12765, niso dosegli zahtevanih vrednosti. Tako spojenega

lesa torej praviloma ne moremo uporabiti za nekonstrukcijske namene v suhih prostorih, vendar bi bili spoji primerni za manj zahtevne načine uporabe v pohištveni industriji.

Po drugi strani pa so lepilni spoji, tvorjeni z UF lepilom, dosegli zahteve standarda po vseh treh načinih priprave in so se tako na koncu izkazali za odpornejše.

Zvarjen bukov les sicer ima določeno trdnost, ki pa je nižja od lepljencev spojenih z UF lepilom. Odpornost zvarjenega lesa na povišano vlažnost nekoliko izboljšamo, če ga pred varjenjem termično modificiramo.

7 VIRI

- Atar M., Keskin H., Güçlü Yavuzcan H. 2007. Impacts of impregnation with boron compounds on the bonding strength of some wood materials. V: Proceedings of the 5th COST E34 international workshop, Bled, Slovenia, 6th September 2007: 31-37
- Belleville B., Stevanovic T., Cloutier A., Pizzi A., Prado M., Erakovic S., Diouf P. N., Royer. M. 2013. An investigation of thermochemical changes in Canadian hardwood species during wood welding. *European journal of wood production*, 71: 245-257
- Boonstra M., Pizzi A., Ganne-Chedeville C., Properzi M., Leban J. M. . 2006. Vibrational welding of heat-treated wood. *Journal of adhesion science and technology*, 20, 4,: 359-369
- Boonstra M., Van Acker J., Kegel E. 2007. Effect of a two-stage heat treatment process on the mechanical properties of full construction timber. *Wood material science and engineering*, 2, 3-4: 138-146
- Despot R., Hasan M., Jug M., Šefc B. 2008. Biological durability of wood modified by citric acid. *Drvena industrija*, 59, 2: 55-59
- Esteves B. M. in Pereira H. M. 2009. Wood modification by heat treatment: A review. *Bioresources*, 4, 1: 370-404
- Ganne-Chedeville C., Leban J. M., Properzi M., Pichelin F., Pizzi A. 2006. Temperature and density distribution in mechanical vibration wood welding. *Wood science and technology*, 40: 72-76
- Gfeller B., Zanetti M., Properzi M., Pizzi A., Pichelin F., Lehmann M. In Delmotte L. 2003. Wood bonding by vibrational welding. *Journal of adhesion science and technology*, 17, 11: 1573-1589
- GreCon International. Establishing the raw density profile with the laboratory density analyser Dax 5000
<http://www.grecon.com/en/density-analyser-dax-5000> (5. 4. 2014)
- Hahn B., Vallée T., Stamm B., Weinand Y. 2012. Experimental investigations and probabilistic strenght prediction of linear welded double lap joints compose of timber. *International journal of adhesion and adhesives*, 39: 42-48
- Hill C. 2006. Wood modification: Chemical, thermal and other processes. Wiley, UK: 206
- Humar M., Lesar B., Ugovšek A., Kariž M., Kralj P., Šernek M. 2011. Influence addition of boron compounds to adhesives on the bonding quality and fungicidal properties of glued wood. *Wood research*, 56, 3: 285-296
- Kamdern D. P., Pizzi A., Jermannaud A. 2002. Durability of heat-treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 60: 1-6
- Kariž M., Šernek M. 2008. Lepljenje termično modificiranega lesa. *Les*, 60, 7/8: 275-282

- Kollmann F. in Schneider A. 1963. On the sorption behaviour of heat stabilized wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 21, 3: 77-85
- Leban J. M. 2005. Wood welding-an award winning discovery. *News and views from SNS- Nordic forest research co-operation committee*, 4: 285-286
- Leban J. M., Pizzi A., Properzi M., Pichelin F., Gelhaye P., Rose C. 2005. Wood welding: A challenging alternative to conventional wood gluing. *Scandinavian journal of forest research*, 20: 534-538
- Mansouri H. R., Omrani P., Pizzi A. 2009. Improving the water resistance of linear vibration-welded wood joints. *Journal of adhesion science and technology*, 23,1: 63-70
- Mansouri H. R., Pizzi A., Leban J. M., Delmotte L., Lindgren O., Vaziri M. 2011. Causes for the improved water resistance in pine wood linear welded joints. *Journal of adhesion science and technology*, 25: 1987-1995
- Miklečić J., Jirouš-Rajković V. 2011. Accelerated weathering of coated and uncoated beech wood modified with citric acid. *Drvena industrija*, 62, 4: 277-282
- Obataya E. in Shibutani S. 2005. Swelling of acetylated wood in organic solvents. *Journal of materials science*, 40: 4113-4115
- Obataya E. 2005. Reversible volumetric changes of acetylated wood with after-treatments. *Wood science and technology*, 39: 472-483
- Omrani P., Masson E., Pizzi A., Mansouri H. R. 2008. Emission gases in linear vibration welding of wood. *Journal of adhesion science and technology*, 23: 85-94
- Omrani P., Mansouri H. R., Pizzi A. 2009. Linear welding of grooved wood surfaces. *European journal of wood and wood products*, 67: 479-481
- Omrani P., Mansouri H. R., Pizzi A., Masson E. 2010. Influence of grain direction and pre-heating on linear wood welding. *European journal of wood production*, 68: 113-114
- Omrani P., Mansouri H. R., Duchanios G., Pizzi A. 2013a. Fracture mechanics of linearly welded wood joints: Effect of wood species and grain orientation. *Journal of adhesion science and technology*, 23, 16: 2057-2072
- Omrani P., Pizzi A., Mansouri H. R., Leban J. M. 2013b. Physico-chemical causes of the extent of water resistance of linearly welded wood joints. *Journal of adhesion science and technology*, 23, 6: 827-837
- Peyer S. M., Wolcott M. P., Fenoglio D. J. 2000. Reducing moisture swell of densified wood with polycarboxylic acid resin. *Wood and fibre science*, 32, 4: 520-526
- Pizzi A., Mansouri H. R., Leban J. M., Delmott L., Pichelin F. 2011. Enhancing the exterior performance of wood joined by linear and rotational welding. *Journal of adhesion science and technology*, 25: 2717-2730
- Pizzi A., Zhou X., Navarrete P., Segovia C., Mansouri H. R., Placentia Pena M. I., Pichelin F. 2013. Enhancing water resistance of welded dowel wood joints by acetylated lignin. *Journal of adhesion science and technology*, 27: 252-262

- Pohleven F., Rep G. 2004. Postopek termične modifikacije lesa v vakuumu. Urad Republike Slovenije za intelektualno lastnino, Ljubljana, patentna prijava št. P-200400064: 6 str.
- Rep G., Humar M., Pohleven F. 2010. Resistance of thermo-vacuum modified wood against wood pests. First Serbian forestry congress, Faculty of forestry, Belgrade University, Serbia, 11.-13. november 2010: 1564-1570
- Rep G., Pohleven F., Bučar B. 2004. Characteristics of thermally modified wood in vacuum. V: International research group on wood preservation. IRG documents: 35, 6-10 June 2004, Ljubljana, Slovenia: 9 str.
- Rep G., Pohleven F. 2009. Komora za termično modifikacijo lesa z začetnim vakuumom. Les, 62, 9: 413-414
- Resnik J. 1997. Lepila in lepljenje lesa. 1. ponatis. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 105 str.
- Segovia C., Zhou X., Pizzi A. 2013. Wood blockboards for construction fabricated by wood welding with pre-oiled dowels. Journal of adhesion science and technology, 27, 5-6: 577-58
- SIST EN 205. 2003. Lepila - Lepila za les za nekonstrukcijsko uporabo - Ugotavljanje natezno strižne trdnosti spojev s preklopom
- SIST EN 12765. 2002. Razvrstitev duromernih lepil za les za nekonstrukcijsko uporabo
- Stamm B., Windeisen E., Natterer J., Wegene G. . 2006. Chemical investigations on the thermal behaviour of wood during friction welding. Wood science and technology, 40: 615-627
- Stamm B., Weinand Y., Hahn B., Rossmair G. 2011. Influence of the moisture content on the shear strength of welded wood-to-wood connections. COST Action FP0904 workshop, Biel, Switzerland
- Stamm B., Natterer J., Navi P. 2005. Joining wood by friction welding. Holz als Roh- und Werkstoff, 63: 313-320
- Suezzone C. 1979. Wood treatment for preserving bondability. Canadian patents and development limited, Ottawa, Canada: 1-5
- Šefc B., Trajković J., Sinković T., Hasan M., Ištók I. 2012. Compression strenght of fir and beech wood modified by citric acid. Drvna industrija, 63, 1: 45-50
- Šernek M., Kutnar A. 2009. Aminoplastična lepila. Les, 61: 47-53
- Šernek M., Humar M., Kumer M., Pohleven F. 2007. Bonding of thermally modified spruce with PF and UF adhesives. V: Proceedings of the 5th COST E34 international workshop, Bled, Slovenia, 6th September 2007: 31-37
- Šernek M., Boonstra M., Pizzi A., Despres A., Gérardin P. 2008. Bonding performance of heat treated wood with structural adhesives. Holz als Roh- und Werkstoff, 66, 3: 173-180

- Umemura K., Tomohide U., Shuichi K. 2012. Characterisation of wood-based molding bonded with citric acid. *Journal of wood science*, 58, 1: 38-45
- Vaziri M., Lindgren O., Pizzi A., Mansouri H. R. 2010. Moisture sensitivity of Scots Pine joints produced by linear frictional welding. *Journal of adhesion science and technology*, 24: 1515-1527
- Vaziri M., Lindgren O., Pizzi A. 2011a. Influence of welding parameters on weldline density and its relation to crack formation in welded Scots pine joints. *Journal of adhesion science and technology*, 25: 1819-1828
- Vaziri M., Orädd G., Lindgren O., Pizzi A. 2011b. Magnetic resonance imaging of water distribution in welded woods. *Journal of adhesion science and technology*, 25: 1997-2003
- Vaziri M., Lindgren O., Pizzi A. 2012. Optimization of tensile-shear strength for linear welded scots pine. *Journal of adhesion science and technology*, 26: 109-119
- Windeisen E., Claudia Strobel C., Wegener G. 2007. Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood. *Wood science and technology*, 41: 523-536
- Župčić I. 2010. Čimbenici koji utječu na spajanje tokarenih bukovih elemenata tehnikom zvarivanja. Doktorska disertacija. Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, 238 str.

ZAHVALA

Zahvaljujem se prof. dr. Milanu Šerneku za usmerjanje pri nastajanju in oblikovanju magistrske naloge ter prof. dr. Antoniu Pizziju, ki mi je omogočil delo v laboratorijih inštituta Enstib v Epinalu v Franciji. Hvala tudi prof. dr. Francu Pohlevnu za recenzijo magistrske naloge.

Zahvalil bi se Gregorju Repu iz podjetja Silvaproduct d.o.o., ki mi je priskrbel material za izvedbo eksperimentov. Hvala tudi mag. Bogdanu Šegi in tehničnemu sodelavcu Janiju Renku z Oddelka za lesarstvo za pomoč pri pripravi materiala.

Za pomoč in nasvete pri eksperimentalnem delu pa bi se rad zahvalil mlademu raziskovalcu Matjažu Čopu, Clement Lacostu in Haiyang Zhangu iz laboratorija Enstib.

Hvala moji družini, ki me je ves čas tekom študija in nastajanja magistrske naloge vzpodbujala.

PRILOGE

Priloga A:

Podatki meritev in statistika strižnih trdnosti spojev ter deleža loma po lesu preizkušancev po 1. načinu priprave

Varjena naravna bukovina, netretirana							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	BN02	19,4	10,3	199	1520	7,6	0
2	BN03	19,4	10,1	195	1430	7,3	0
3	BN04	19,8	10,2	201	1480	7,4	0
4	BN06	19,4	10,2	198	1680	8,5	25
5	BN07	17,0	10,2	173	1130	6,6	0
6	BN08	17,6	10,1	177	1800	10,2	100
7	BN09	19,8	9,7	193	1760	9,2	0
8	BN11	20,0	10,1	202	2180	10,8	25
9	BN46	18,8	10,0	188	1620	8,6	0
10	BN47	19,1	10,0	190	1800	9,4	0
					Min.	6,6	0
					Maks.	10,8	100
					Povprečje	8,6	15
					St. odklon	1,36	32

Varjena naravna bukovina, netretirana, s povišano ravnovesno vlažnostjo							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	B801	18,6	10,3	192	826	4,3	25
2	B804	18,8	10,3	193	1210	6,3	0
3	B805	19,1	10,3	197	1200	6,1	0
4	B806	19,3	10,5	202	1540	7,6	0
5	B807	18,7	10,1	188	748	4,0	0
6	B808	18,6	10,3	191	1470	7,7	0
7	B809	19,0	10,1	192	985	5,2	0
8	B844	19,0	10,3	195	790	4,0	0
9	B845	19,6	11,0	215	1020	4,8	0
10	B846	17,6	10,1	179	1120	6,3	0
					Min.	4,0	0
					Maks.	7,7	25
					Povprečje	5,6	3
					St. odklon	1,39	8

Varjena naravna bukovina, tretirana z 10 % raztopino borove kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	BB01	19,3	10,0	193	637	3,3	0
2	BB02	18,2	10,0	183	949	5,2	25
3	BB03	19,4	10,1	196	724	3,7	0
4	BB04	17,8	10,2	180	677	3,8	0
5	BB05	18,4	10,0	184	1500	8,1	0
6	BB06	19,1	9,8	187	1270	6,8	0
7	BB07	19,2	9,9	191	256	1,3	0
8	BB09	19,4	10,1	197	571	2,9	0
9	BB10	19,5	10,1	196	1040	5,3	0
10	BB11	20,1	10,2	205	463	2,3	0
					Min.	1,3	0
					Maks.	8,1	25
					Povprečje	4,3	3
					St. odklon	2,09	8

Varjena naravna bukovina, tretirana z 10 % raztopino citronske kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	BC03	19,9	10,0	198	1110	5,6	25
2	BC04	17,5	10,1	176	1330	7,6	0
3	BC05	20,5	9,9	202	1480	7,3	25
4	BC06	20,7	10,0	208	1280	6,1	0
5	BC07	19,3	9,9	192	1060	5,5	0
6	BC08	20,4	10,0	205	1430	7,0	25
7	BC09	20,7	10,0	206	1290	6,3	25
8	BC10	20,6	10,0	205	1470	7,2	25
9	BC11	20,9	9,9	206	1490	7,2	25
10	BC47	19,9	9,4	187	1140	6,1	25
					Min.	5,5	0
					Maks.	7,6	25
					Povprečje	6,6	18
					St. odklon	0,74	12

Varjena naravna bukovina, tretirana z 10 % raztopino očetne kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	BO 02	20,6	10,1	208	1670	8,1	0
2	BO 03	20,9	10,1	210	1620	7,7	0
3	BO 04	20,6	9,4	195	1380	7,1	0
4	BO 05	17,1	10,2	174	1460	8,4	0
5	BO 06	19,2	10,1	193	1940	10,0	0
6	BO 07	19,0	9,9	188	1190	6,4	0
7	BO 08	18,4	10	185	1490	8,1	0
8	BO 09	19,0	10,2	193	1440	7,5	0
9	BO 11	19,6	10,1	197	1710	8,7	0
10	BO 47	21,6	10	216	1430	6,6	0
					Min.	6,4	0
					Maks.	10,0	0
					Povprečje	7,8	0
					St. odklon	1,1	0

Varjena naravna bukovina, vakuumsko impregnirana z 10 % raztopino citronske kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	BC01-V10	18,4	10,0	183	936	5,1	25
2	BC02-V10	19,0	9,9	189	1550	8,2	25
3	BC03-V10	19,6	9,4	184	1500	8,2	25
					Min.	5,1	25
					Maks.	8,2	25
					Povprečje	7,2	25
					St. odklon	1,78	0

Naravna bukovina, zlepljena z UF lepilom							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	BUF02	20,3	10,1	204	2510	12,3	100
2	BUF03	20,0	10,1	201	2630	13,1	100
3	BUF04	20,0	10,1	202	2580	12,8	100
4	BUF05	19,9	10,1	200	2410	12,0	100
5	BUF06	20,1	10,1	202	2400	11,8	75
6	BUF07	19,9	10,1	201	3030	15,1	100
7	BUF08	20,2	10,1	203	3370	16,6	100
8	BUF45	19,8	10,1	200	3310	16,6	75
9	BUF49	19,9	10,1	201	3160	15,7	100
10	BUF50	20,0	10,1	202	3380	16,8	100
					Min.	11,8	75
					Maks.	16,8	100
					Povprečje	14,3	95
					St. odklon	2,07	11

Varjena TM bukovina, netretirana							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	M01	17,7	9,6	169	1560	9,2	25
2	M03	18,6	10,1	188	1540	8,2	100
3	M04	19,0	10,2	194	1640	8,5	25
4	M05	19,2	10,1	194	1710	8,8	25
5	M06	19,6	10,1	197	1870	9,5	0
6	M07	19,5	10,2	199	1820	9,1	25
7	M08	18,7	9,9	185	1430	7,7	50
8	M09	18,9	10,0	188	1560	8,3	75
9	M45	19,1	10,3	196	1850	9,4	0
10	M47	17,8	10,2	182	1600	8,8	0
					Min.	7,7	0
					Maks.	9,5	100
					Povprečje	8,8	33
					St. odklon	0,58	33

Varjena TM bukovina, netretirana, s povišano ravnovesno vlažnostjo							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	M802	18,9	10,3	195	1950	10,0	50
2	M803	19,1	11,0	209	1820	8,7	75
3	M804	19,0	11,0	209	1940	9,3	0
4	M805	19,3	10,9	210	1920	9,2	75
5	M806	19,0	11,0	210	2600	12,4	100
6	M807	19,4	11,1	215	2300	10,7	75
7	M809	19,4	11,1	215	2640	12,3	75
8	M845	19,8	11,0	217	1830	8,4	100
9	M846	19,9	10,9	216	1830	8,5	50
10	M847	17,7	10,9	193	1610	8,3	25
					Min.	8,3	0
					Maks.	12,4	100
					Povprečje	9,8	63
					St. odklon	1,55	32

Varjena TM bukovina, tretirana z 20 % raztopino citronske kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MC01-20	20,3	10,2	208	1990	9,6	25
2	MC02-20	19,4	10,2	198	1430	7,2	0
3	MC03-20	19,7	9,8	192	2130	11,1	25
4	MC04-20	19,2	9,8	187	1920	10,2	50
5	MC06-20	20,1	10,2	204	2360	11,6	0
6	MC07-20	19,3	10,3	198	2050	10,3	75
7	MC08-20	19,0	10,2	193	1900	9,9	25
8	MC09-20	19,6	10,3	202	1580	7,8	75
9	MC10-20	19,3	9,7	188	1910	10,2	0
10	MC40-20	18,9	11,2	211	1140	5,4	75
					Min.	5,4	0
					Maks.	11,6	75
					Povprečje	9,3	35
					St. odklon	1,93	32

Varjena TM bukovina, tretirana z 10 % raztopino borove kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MB01	17,0	10,0	169	833	4,9	75
2	MB03	19,5	10,0	195	1480	7,6	100
3	MB04	19,7	10,0	197	1480	7,5	50
4	MB05	18,6	10,0	186	1060	5,7	50
5	MB07	18,7	10,1	189	1830	9,6	75
6	MB08	18,0	10,0	180	1470	8,1	0
7	MB09	18,8	10,0	188	788	4,2	50
8	MB10	18,9	10,1	190	1760	9,3	100
9	MB11	17,6	10,1	178	1200	6,7	25
10	MB46	18,4	9,9	183	1380	7,5	25
					Min.	4,2	0
					Maks.	9,6	100
					Povprečje	7,1	55
					St. odklon	1,77	33

Varjena TM bukovina, tretirana z 10 % raztopino citronske kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MC02	17,9	10,5	189	2070	11,0	50
2	MC03	17,2	10,2	176	1770	10,1	50
3	MC04	18,5	10,2	188	2280	12,1	50
4	MC05	18,8	10,3	193	1890	9,8	50
5	MC08	19,3	10,3	199	1740	8,7	75
6	MC09	19,3	10,3	199	1800	9,1	50
7	MC46	18,4	10,2	187	2110	11,3	75
8	MC47	16,8	10,1	170	1500	8,8	100
9	MC48	17,1	10,2	175	1610	9,2	75
10	MC49	18,5	10,2	189	1710	9,0	75
					Min.	8,7	50
					Maks.	12,1	100
					Povprečje	9,9	65
					St. odklon	1,18	17

Varjena TM bukovina, tretirana z 10 % raztopino očetne kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MO01	18,3	10,2	186	1590	8,5	50
2	MO02	19,0	10,1	193	2030	10,5	25
3	MO03	19,3	10,2	197	1790	9,1	25
4	MO06	19,0	10,1	192	1730	9,0	25
5	MO07	18,9	10,4	196	1890	9,6	75
6	MO08	19,7	10,5	208	2100	10,1	50
7	MO46	19,4	10,0	194	1640	8,5	25
8	MO47	18,7	9,3	175	2220	12,7	50
9	MO48	19,2	9,8	188	2140	11,4	75
10	MO49	17,6	9,8	172	1690	9,8	50
					Min.	8,5	25
					Maks.	12,7	75
					Povprečje	9,9	45
					St. odklon	1,33	20

Varjena TM bukovina, vakuumsko impregnirana z 10 % raztopino citronske kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MC01-V10	18,8	10,0	188	1360	7,2	75
2	MC02-V10	19,7	10,0	197	2150	10,9	100
3	MC03-V10	19,8	9,9	197	1300	6,6	50
					Min.	6,6	50
					Maks.	10,9	100
					Povprečje	8,2	75
					St. odklon	2,33	25

Varjena TM bukovina, vakuumsko impregnirana z 20 % raztopino citronske kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MC01-V20	20,4	9,5	193	1700	8,8	75
2	MC03-V20	19,7	9,5	187	2380	12,7	50
3	MC04-V20	20,2	9,5	193	1550	8,0	100
4	MC05-V20	19,7	9,3	183	1970	10,8	100
5	MC15-V20	18,6	9,4	175	2470	14,1	75
6	MC16-V20	17,5	9,5	167	1410	8,5	75
					Min.	8,0	50
					Maks.	14,1	100
					Povprečje	10,5	79
					St. odklon	2,5	19

Priloga B:

Podatki meritev in statistika strižnih trdnosti spojev ter deleža loma po lesu preizkušancev po 2. načinu priprave

Varjena naravna bukovina, netretirana							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	BN 12	19,4	10,1	195	17	0,1	0
2	BN 13	19,3	10,1	195	377	1,9	0
3	BN 14	19,9	10,3	206	476	2,3	25
4	BN 15	19,2	10,2	196	6	0,0	0
5	BN 16	19,8	10,2	202	5	0,0	0
6	BN 17	19,6	10,3	201	286	1,4	0
7	BN 18	18,8	10,3	194	15	0,1	0
8	BN 19	18,2	10,2	186	100	0,5	0
9	BN 20	18,9	9,8	184	245	1,3	0
10	BN 21	19,3	10,2	196	18	0,1	0
					Min.	0,0	0
					Maks.	2,3	25
					Povprečje	0,8	3
					St. odklon	0,9	8

Varjena naravna bukovina, netretirana, s povišano ravnovesno vlažnostjo							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	B8 11	18,7	10,2	191	317	1,7	0
2	B8 12	18,9	10,2	192	3	0,0	0
3	B8 13	18,7	10,1	189	3	0,0	0
4	B8 14	17,9	10,3	183	305	1,7	0
5	B8 15	18,2	9,9	179	185	1,0	0
6	B8 16	19,1	10,1	193	459	2,4	25
7	B8 17	19,1	10,1	193	130	0,7	0
8	B8 18	19,1	10,1	193	3	0,0	0
9	B8 19	19,0	10,3	196	740	3,8	25
10	B8 20	18,8	10,1	189	173	0,9	0
					Min.	0,0	0
					Maks.	3,8	25
					Povprečje	1,2	5
					St. odklon	1,2	11

Varjena naravna bukovina, tretirana z 10 % raztopino borove kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	BB 12	19,3	10,2	195	160	0,8	0
2	BB 13	18,9	9,8	184	3	0,0	0
3	BB 14	19,9	9,9	196	25	0,1	0
4	BB 16	18,7	10	187	359	1,9	0
5	BB 18	19,7	9,9	194	7	0,0	0
6	BB 19	20,3	10,2	207	358	1,7	0
7	BB 20	19,5	10	195	239	1,2	0
8	BB 21	19,5	10,1	197	3	0,0	0
9	BB 22	18,4	10,1	186	0	0,0	0
10	BB 23	19,9	10,2	201	73	0,4	0
					Min.	0,0	0
					Maks.	1,9	0
					Povprečje	0,6	0
					St. odklon	0,8	0

Varjena naravna bukovina, tretirana z 10 % raztopino citronske kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	BC 12	19,0	11	208	401	1,9	0
2	BC 13	20,8	10	207	310	1,5	0
3	BC 14	20,7	10	206	340	1,7	0
4	BC 15	20,5	10	205	468	2,3	0
5	BC 16	20,8	10,1	209	3	0,0	0
6	BC 17	20,9	9,9	207	46	0,2	0
7	BC 18	19,7	10,1	199	184	0,9	0
8	BC 19	20,7	10,1	208	130	0,6	0
9	BC 20	20,4	9,5	194	203	1,1	25
10	BC 21	19,9	10	198	255	1,3	0
					Min.	0,0	0
					Maks.	2,3	25
					Povprečje	1,1	3
					St. odklon	0,7	8

Varjena naravna bukovina, tretirana z 10 % raztopino očetne kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	BO 12	18,9	9,5	178	3	0,0	0
2	BO 13	20,4	11,5	235	315	1,3	0
3	BO 14	19,5	10,1	198	634	3,2	0
4	BO 15	19,7	10,3	203	219	1,1	0
5	BO 16	19,6	10,2	199	319	1,6	0
6	BO 17	21,5	10,2	218	413	1,9	0
7	BO 18	19,9	10,1	201	73	0,4	0
8	BO 19	20,0	10,1	201	155	0,8	0
9	BO 20	20,4	10,1	205	385	1,9	0
10	BO 21	20,7	10,1	208	278	1,3	0
					Min.	0,0	0
					Maks.	3,2	0
					Povprečje	1,4	0
					St. odklon	0,9	0

Varjena naravna bukovina, vakuumsko impregnirana z 10 % raztopino citronske kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	BC 04-V10	18,2	10,0	182	142	0,8	0
2	BC 05-V10	18,2	9,9	180	319	1,8	0
					Min.	0,8	0
					Maks.	1,8	0
					Povprečje	1,3	0
					St. odklon	0,7	0

Naravna bukovina, zlepljena z UF lepilom							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	BUF 11	19,9	9,9	198	498	2,5	50
2	BUF 12	20,3	10,1	205	1240	6,0	100
3	BUF 13	20,3	10,1	204	925	4,5	75
4	BUF 14	20,0	10,1	201	1130	5,6	100
5	BUF 15	20,0	10,1	201	1240	6,2	75
6	BUF 16	20,0	10,1	202	1530	7,6	100
7	BUF 17	20,1	10,2	204	1400	6,9	75
8	BUF 18	20,0	10,2	204	1190	5,9	75
9	BUF 19	19,9	10,1	200	1480	7,4	100
10	BUF 20	20,2	10	203	1570	7,7	100
					Min.	2,5	50
					Maks.	7,7	100
					Povprečje	6,0	85
					St. odklon	1,6	17

Varjena TM bukovina, netretirana							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	M 11	18,7	9,9	186	506	2,7	0
2	M 12	19,1	10,1	192	513	2,7	0
3	M 13	19,5	10	194	418	2,2	0
4	M 14	19,0	10	190	853	4,5	0
5	M 15	19,5	9,9	193	617	3,2	25
6	M 16	19,1	10	191	952	5,0	0
7	M 17	19,4	10	194	892	4,6	0
8	M 18	17,9	10	179	181	1,0	0
9	M 19	19,3	9,9	190	913	4,8	0
10	M 20	19,9	10	198	918	4,6	25
					Min.	1,0	0
					Maks.	5,0	25
					Povprečje	3,5	5
					St. odklon	1,4	11

Varjena TM bukovina, s povišano ravnovesno vlažnostjo							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	M8 11	19,4	10,2	198	521	2,6	0
2	M8 12	19,5	10,2	199	562	2,8	0
3	M8 13	19,1	10,9	209	678	3,2	25
4	M8 14	19,9	11,1	222	601	2,7	0
5	M8 15	19,8	10,3	203	846	4,2	0
6	M8 16	19,5	11,1	215	660	3,1	0
7	M8 17	19,9	11	220	616	2,8	0
8	M8 18	18,9	10,9	207	704	3,4	0
9	M8 19	17,1	10,9	187	207	1,1	0
10	M8 20	18,4	11	203	554	2,7	0
					Min.	1,1	0
					Maks.	4,2	25
					Povprečje	2,9	3
					St. odklon	0,8	8

Varjena TM bukovina, tretirana z 20 % raztopino citronske kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MC 11-20	19,0	9,6	182	229	1,3	0
2	MC 12-20	19,0	9,6	182	187	1,0	0
3	MC 13-20	19,6	10,3	202	282	1,4	0
4	MC 14-20	19,8	10,4	205	46	0,2	0
5	MC 15-20	19,2	10,2	196	674	3,4	25
6	MC 16-20	20,2	9,7	195	193	1,0	0
7	MC 17-20	20,2	9,2	185	44	0,2	0
8	MC 18-20	19,4	10,1	196	357	1,8	0
9	MC 19-20	19,8	10,2	202	40	0,2	0
10	MC 20-20	20,2	10,3	207	255	1,2	0
					Min.	0,2	0
					Maks.	3,4	25
					Povprečje	1,2	3
					St. odklon	1,0	8

Varjena TM bukovina, tretirana z 10 % raztopino borove kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MB12	18,9	9,8	181	433	2,4	0
2	MB14	19,1	10,1	173	351	2,0	0
3	MB15	18,5	10	186	171	0,9	0
4	MB16	17,9	10	179	126	0,7	0
5	MB17	18,7	10,1	189	4	0,0	0
6	MB18	17,5	10,1	177	381	2,2	0
7	MB19	18,2	9,9	181	832	4,6	0
8	MB20	18,2	9,9	181	90	0,5	0
9	MB21	16,9	9,9	168	3	0,0	0
					Min.	0,0	0
					Maks.	4,6	0
					Povprečje	1,5	0
					St. odklon	1,5	0

Varjena TM bukovina, tretirana z 10 % raztopino citronske kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MC 13	18,4	10,2	187	456	2,4	0
2	MC 14	18,7	10,2	190	371	2,0	0
3	MC 15	18,9	9,6	181	504	2,8	0
4	MC 16	18,5	9,6	178	655	3,7	0
5	MC 17	18,5	9,6	177	801	4,5	0
6	MC 18	18,1	10,2	185	188	1,0	0
7	MC 19	19,0	10,2	194	11	0,1	0
8	MC 20	18,6	10,3	192	3	0,0	0
9	MC 21	18,9	10,3	195	3	0,0	0
					Min.	0,0	0
					Maks.	4,5	0
					Povprečje	1,8	0
					St. odklon	1,7	0

Varjena TM bukovina, tretirana z 10 % raztopino očetne kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MO 12	19,6	9,4	184	558	3,0	0
2	MO 13	19,5	9,9	193	511	2,6	0
3	MO 14	19,3	10	193	541	2,8	0
4	MO 15	19,3	10	193	584	3,0	0
5	MO 16	19,8	9,9	197	248	1,3	0
6	MO 17	19,6	9,9	194	438	2,3	0
7	MO 18	19,3	10	192	427	2,2	0
8	MO 19	19,2	10,1	194	505	2,6	0
9	MO 20	19,3	10,1	195	505	2,6	0
10	MO 21	19,4	10	193	618	3,2	0
					Min.	1,3	0
					Maks.	3,2	0
					Povprečje	2,6	0
					St. odklon	0,6	0

Varjena TM bukovina, vakuumsko impregnirana z 10 % raztopino citronske kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MC 04-V10	19,3	9,8	188	793	4,2	0
2	MC 05-V10	19,6	9,9	195	473	2,4	25
					Min.	2,4	0
					Maks.	4,2	25
					Povprečje	3,3	13
					St. odklon	1,3	18

Varjena TM bukovina, vakuumsko impregnirana z 20 % raztopino citronske kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MC 06-V20	19,3	9,6	186	441	2,4	0
2	MC 07-V20	19,5	9,5	185	420	2,3	0
2	MC 08-V20	19,5	9,5	186	740	4,0	0
					Min.	2,3	0
					Maks.	4,0	0
					Povprečje	2,9	0
					St. odklon	1,0	0

TM bukovina, zlepljena z UF lepilom							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MUF 11	18,6	10	186	1440	7,7	100
2	MUF 12	18,4	10,1	186	1200	6,5	50
3	MUF 13	16,7	10,1	169	1600	9,5	75
4	MUF 14	18,7	10,1	189	1540	8,2	100
5	MUF 15	18,7	10,2	190	1130	6,0	100
6	MUF 16	18,7	10,1	189	1590	8,4	50
7	MUF 17	18,6	10,1	188	1620	8,7	75
8	MUF 18	18,7	10,1	188	870	4,6	75
9	MUF 19	18,7	10,1	189	1760	9,3	75
10	MUF 20	18,7	10,2	190	1410	7,4	100
					Min.	4,6	50
					Maks.	9,5	100
					Povprečje	7,6	80
					St. odklon	1,5	20

Priloga C:

Podatki meritev in statistika strižnih trdnosti spojev ter deleža loma po lesu preizkušancev po 3. načinu priprave

Varjena naravna bukovina, netretirana							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	BN 23	18,5	10	185	83	0,5	0
2	BN 24	18,5	10	185	185	1,0	0
3	BN 25	18,7	10	187	86	0,5	0
4	BN 26	18,1	10,1	182	136	0,7	0
5	BN 27	17,3	10,1	175	68	0,4	0
6	BN 28	18,8	10,1	190	307	1,6	0
7	BN 29	19,6	10,1	197	3	0,0	0
8	BN 30	20,0	10,3	205	48	0,2	0
9	BN 31	19,0	10,2	193	285	1,5	0
10	BN 32	18,9	10,2	192	23	0,1	0
					Min.	0,0	0
					Maks.	1,6	0
					Povprečje	0,7	0
					St. odklon	0,6	0

Varjena naravna bukovina, netretirana, s povišano ravnovesno vlažnostjo							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	B8 21	19,1	10,2	194	3	0,0	0
2	B8 22	18,0	10,1	181	90	0,5	0
3	B8 23	18,8	10,4	195	4	0,0	0
4	B8 24	18,6	10,9	202	689	3,4	25
5	B8 25	19,0	11	208	247	1,2	0
6	B8 26	18,8	10,8	204	3	0,0	0
7	B8 27	18,7	10,9	203	10	0,0	0
8	B8 28	19,1	10,8	206	616	3,0	0
9	B8 31	19,6	10,2	200	3	0,0	0
10	B8 32	18,5	10,2	188	476	2,5	25
					Min.	0,0	0
					Maks.	3,4	25
					Povprečje	1,1	5
					St. odklon	1,4	11

Varjena naravna bukovina, tretirana z 10 % raztopino borove kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	BB 25	19,0	9,9	189	3	0,0	0
2	BB 27	19,9	10,1	201	92	0,5	0
3	BB 28	19,0	10,1	192	3	0,0	0
4	BB 29	19,6	10,2	200	3	0,0	0
5	BB 30	19,1	10	191	3	0,0	0
6	BB 31	17,2	10,1	173	3	0,0	0
7	BB 32	19,3	10,1	195	3	0,0	0
8	BB 34	19,2	10	192	196	1,0	0
9	BB 37	20,5	10,1	208	76	0,4	0
10	BB 38	19,1	10,1	192	3	0,0	0
					Min.	0,0	0
					Maks.	1,0	0
					Povprečje	0,2	0
					St. odklon	0,3	0

Varjena naravna bukovina, tretirana z 10 % raztopino citronske kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	BC 22	19,5	10	195	197	1,0	0
2	BC 23	20,7	10,1	208	354	1,7	0
3	BC 25	19,2	10	191	750	3,9	0
4	BC 26	20,3	10,1	204	712	3,5	25
5	BC 28	19,9	9,8	194	317	1,6	0
6	BC 29	20,5	9,5	194	39	0,2	0
7	BC 30	19,5	9,8	191	36	0,2	0
8	BC 31	21,0	9,3	195	662	3,4	75
9	BC 32	19,0	9,3	176	13	0,1	0
10	BC 33	19,9	9,3	186	3	0,0	0
					Min.	0,0	0
					Maks.	3,9	75
					Povprečje	1,6	10
					St. odklon	1,5	24

Varjena naravna bukovina, tretirana z 10 % raztopino očetne kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	BO 22	19,8	9,3	184	169	0,9	0
2	BO 23	20,6	10,1	207	3	0,0	0
3	BO 24	19,1	9,4	179	182	1,0	0
4	BO 25	20,6	10,1	208	378	1,8	0
5	BO 26	20,6	10,1	208	306	1,5	0
6	BO 28	20,3	10	202	3	0,0	0
7	BO 29	18,9	10,1	191	6	0,0	0
8	BO 30	19,3	10,1	194	14	0,1	0
9	BO 31	19,2	10,2	196	467	2,4	0
10	BO 34	20,5	10,1	206	447	2,2	0
					Min.	0,0	0
					Maks.	2,4	0
					Povprečje	1,0	0
					St. odklon	0,9	0

Varjena naravna bukovina, vakuumsko impregnirana z 10 % raztopino citronske kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	BC 06-V10	19,3	10,1	195	4	0,0	0
2	BC 07-V10	18,9	9,1	173	21	0,1	0
					Min.	0,0	0
					Maks.	0,1	0
					Povprečje	0,1	0
					St. odklon	0,1	0

Varjena TM bukovina, tretirana z 20 % raztopino citronske kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MC 21-20	19,1	10,1	193	240	1,2	0
2	MC 22-20	20,2	10,1	205	6	0,0	0
3	MC 23-20	20,1	10,2	205	23	0,1	0
4	MC 24-20	19,4	10,3	199	38	0,2	0
5	MC 26-20	19,3	10,3	199	80	0,4	0
6	MC 27-20	19,4	10,2	198	316	1,6	0
7	MC 28-20	19,8	10,3	204	3	0,0	0
8	MC 29-20	19,9	10,3	205	41	0,2	0
9	MC 32-20	19,3	10,1	195	62	0,3	0
10	MC 33-20	19,0	10,4	197	28	0,1	0
					Min.	0,0	0
					Maks.	1,6	0
					Povprečje	0,4	0
					St. odklon	0,5	0

Varjena TM bukovina, netretirana							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	M 21	19,4	10	194	277	1,4	0
2	M 22	19,4	9,1	177	240	1,4	0
3	M 23	19,2	10	192	87	0,5	0
4	M 24	18,0	9,8	177	168	1,0	0
5	M 25	19,1	9,8	188	531	2,8	0
6	M 27	19,3	9,1	176	25	0,1	0
7	M 29	19,3	10,2	196	91	0,5	0
8	M 30	19,5	9,9	192	430	2,3	0
9	M 31	19,0	9,3	176	413	2,3	0
10	M 32	19,0	10,1	192	238	1,2	0
					Min.	0,1	0
					Maks.	2,8	0
					Povprečje	1,3	0
					St. odklon	0,9	0

Varjena TM bukovina, netretirana, s povišano ravovesno vlažnostjo							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	M8 21	19,2	10,9	210	374	1,8	0
2	M8 22	19,4	11	213	176	0,8	0
3	M8 23	19,0	11	208	290	1,4	0
4	M8 25	19,1	11	211	491	2,3	0
5	M8 26	19,6	10,1	197	171	0,9	0
6	M8 27	19,4	11	213	310	1,5	0
7	M8 28	19,4	11	212	488	2,3	0
8	M8 29	19,9	11,1	220	503	2,3	0
9	M8 30	20,1	11,1	223	502	2,3	0
10	M8 31	19,2	11	211	276	1,3	0
					Min.	0,8	0
					Maks.	2,3	0
					Povprečje	1,7	0
					St. odklon	0,6	0

Varjena TM bukovina, tretirana z 10 % raztopino borove kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MB 23	18,9	9,9	188	3	0,0	0
2	MB 24	15,8	10,6	168	490	2,9	0
3	MB 25	19,2	10,1	193	368	1,9	0
4	MB 26	17,5	10,1	176	206	1,2	0
5	MB 27	18,5	10,2	188	576	3,1	0
6	MB 28	18,9	10	189	72	0,4	0
7	MB 30	18,4	9,9	182	47	0,3	0
8	MB 31	19,3	9,8	190	258	1,4	0
9	MB 32	18,7	9,9	185	329	1,8	0
10	MB 33	18,8	9,9	186	10	0,1	0
					Min.	0,0	0
					Maks.	3,1	0
					Povprečje	1,3	0
					St. odklon	1,1	0

Varjena TM bukovina, tretirana z 10 % raztopino citronske kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MC 22	19,5	10,2	199	170	0,9	0
2	MC 23	18,4	10,3	189	27	0,1	0
3	MC 24	19,0	10,2	194	305	1,6	0
4	MC 25	18,3	10,3	188	359	1,9	0
5	MC 26	18,9	10,3	195	383	2,0	0
6	MC 27	18,7	9,5	179	230	1,3	0
7	MC 29	19,3	9,6	185	137	0,7	0
8	MC 30	19,0	10,4	197	5	0,0	0
9	MC 32	19,1	9,8	187	229	1,2	0
10	MC 33	18,8	10,3	194	71	0,4	0
					Min.	0,0	0
					Maks.	2,0	0
					Povprečje	1,0	0
					St. odklon	0,7	0

Varjena TM bukovina, tretirana z 10 % raztopino očetne kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MO 22	19,1	10	191	3	0,0	0
2	MO 23	18,7	9,9	185	56	0,3	0
3	MO 24	18,7	10	187	265	1,4	0
4	MO 26	19,1	10	191	590	3,1	0
5	MO 27	19,1	9,9	190	103	0,5	0
6	MO 28	19,4	9,9	192	363	1,9	0
7	MO 29	18,9	9,9	188	106	0,6	0
8	MO 30	18,3	9,9	181	354	2,0	0
9	MO 31	18,3	9,9	181	134	0,7	0
10	MO 32	19,3	9,8	189	221	1,2	0
					Min.	0,0	0
					Maks.	3,1	0
					Povprečje	1,2	0
					St. odklon	0,9	0

Varjena TM bukovina, vakuumsko impregnirana z 10 % raztopino citronske kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MC 06-V10	17,7	9,9	176	490	2,8	0
2	MC 07-V10	19,6	9,9	194	191	1,0	0
					Min.	1,0	0
					Maks.	2,8	0
					Povprečje	1,9	0
					St. odklon	1,3	0

Varjena TM bukovina, vakuumsko impregnirana z 20 % raztopino citronske kisline							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MC 09-V20	20,2	9,6	193	262	1,4	0
2	MC 10-V20	19,7	9,4	185	157	0,8	0
3	MC 11-V20	19,9	9,9	197	707	3,6	0
4	MC 12-V20	19,4	9,5	185	277	1,5	0
					Min.	0,8	0
					Maks.	3,6	0
					Povprečje	1,8	0
					St. odklon	1,2	0

TM bukovina, zlepljena z UF lepilom							
Št. preizk.	Oznaka preizk.	Širina strižne površine [mm]	Dolžina strižne površine [mm]	Velikost strižne površine [mm ²]	Maksimalna sila loma [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]	Delež loma po lesu [%]
1	MUF 21	18,7	10,2	190	420	2,2	0
2	MUF 22	18,7	10,2	190	400	2,1	0
3	MUF 23	18,7	10,2	190	767	4,0	25
4	MUF 25	18,7	10,1	188	1530	8,1	50
5	MUF 26	18,7	10,2	189	1480	7,8	25
6	MUF 27	18,8	10,1	190	1350	7,1	50
7	MUF 28	18,7	10,2	191	1980	10,4	75
8	MUF 30	16,6	10,2	169	1550	9,2	75
9	MUF 31	18,7	10,1	188	1280	6,8	50
10	MUF 32	18,7	10,2	190	1170	6,2	0
					Min.	2,1	0
					Maks.	10,4	75
					Povprečje	6,4	35
					St. odklon	2,8	29

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Jure ŽIGON

**PRIMERJAVA STRIŽNE TRDNOSTI LINEARNO
VARJENEGA SPOJA BUKOVINE IN UREA-
FORMALDEHIDNEGA LEPILNEGA SPOJA**

MAGISTRSKA NALOGA

Magistrski študij – 2. stopnja

Ljubljana, 2014