

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Matevž PAPEŽ

**VPLIV SESTAVE MUF LEPILNE MEŠANICE IN NANOSA NA
STRIŽNO TRDNOST LEPILNEGA SPOJA**

DIPLOMSKI PROJEKT

Visokošolski strokovni študij – 1. stopnja

**THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF THE MUF
ADHESIVE MIXTURE AND APPLICATION RATE ON THE
SHEAR STRENGTH OF THE ADHESIVE BOND**

B. SC. THESIS

Professional Study Programmes

Ljubljana, 2015

Diplomski projekt je zaključek Visokošolskega strokovnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin na Oddelku za lesarstvu Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete je za mentorja visokošolskega strokovnega diplomskega projekta imenoval prof. dr. Milana Šerneka, za recenzenta pa viš. pred. mag. Bogdana Šego.

Mentor: prof. dr. Milan Šernek

Recenzent: viš. pred. mag. Bogdan Šega

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

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

Matevž PAPEŽ

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dv1
DK	UDK 630*824.831
KG	lepljenje/melamin-urea-formaldehid/nanos lepila/razmerje lepila in trdilca
AV	PAPEŽ, Matevž
SA	ŠERNEK, Milan (mentor)/ŠEGA, Bogdan (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2015
IN	VPLIV SESTAVE MUF LEPILNE MEŠANICE IN NANOSA NA STRIŽNO TRDNOST LEPILNEGA SPOJA
TD	Diplomski projekt (visokošolski strokovni študij – 1. stopnja)
OP	VIII, 49 str., 6 pregl., 23 sl., 11 vir.
IJ	sl
JJ	sl/en
AI	Raziskovali smo vpliv nanosa lepila in razmerja med lepilom in trdilcem na strižno trdnost lepilnega spoja. Preizkušali smo naslednje nanose: 250 g/m², 300 g/m², 350 g/m² in 400 g/m², razmerja med lepilom in trdilcem pa so bila: 100 : 20, 100 : 35, 100 : 60 in 100 : 100. Za testiranje smo uporabljali smrekov les (<i>Picea Abies</i> K). Pripravili smo deske z dimenzijami 600 mm x 120 mm x 32 mm, ki smo jih lepili z melamin-urea-formaldehidnim lepilom, ki se uporablja za lepljenje nosilcev. Lepili smo po tri deske skupaj, kar pomeni, da smo dobili dva lepilna spoja, ki smo ju testirali. Preizkušance smo naredili, kot jih zahteva standard SIST EN 392. Preizkuse smo opravljali na testirnem stroju Zwick. Vse preizkušance smo vizualno ocenili in ugotovili, da je prišlo do 100-odstotnega loma po lesu, kar pomeni, da je lepilo zadostno penetriralo v les in zagotovilo dobro adhezijo med lepilom in lesom. Ugotovili smo, da so imeli vsi preizkušanci strižno trdnost več kot 6 N/mm², kar je spodnja meja po standardu SIST EN 14080, 2013.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dv1

DC UDK 630*824.831

CX Bonding/melamine-urea-formaldehyde/applying adhesive/ratio of adhesive and hardener

AU PAPEŽ, Matevž

AA ŠERNEK, Milan (supervisor)/ ŠEGA, Bogdan (co-supervisor)

PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34

PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology

PY 2015

TI THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF THE MUF ADHESIVE MIXTURE AND APPLICATION RATE ON THE SHEAR STRENGTH OF THE ADHESIVE BOND

DT B. Sc. Thesis (Professional study Programmes)

NO VIII, 49 p., 6 tab., 23 fig., 11 ref.

LA sl

AL sl/en

AB We were studying the influence of application rate of adhesive and the ratio between the adhesive and hardener on the shear strength of adhesive bond. We tested the following application rates: 250 g/m², 300 g/m², 350 g/m², and 400 g/m²; the ratios between the adhesive and the hardener were: 100:20, 100:35, 100:60 and 100:100. For testing, we used spruce wood (*Picea Abies* K). We prepared lamellas with dimensions 600 mm × 120 mm × 32 mm, which we bonded with a melamine-urea-formaldehyde glue, which is used for bonding laminated beams. We glued three lamellas together to obtain two adhesive joints, which were tested. The samples were made as according to standard EN 14080, 2013. The tests were performed on Zwick testing machines. All the test pieces were visually evaluated and it was determined that there was a 100 % fracture of wood, which means that the adhesive is sufficiently penetrated in the timber and ensures a good adhesion between the adhesive and the wood. We determined that all the specimens had shear strength of more than 6 N/mm², which is the lower limit of the standard SIST 14080, 2013.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK.....	IX
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA.....	1
1.2 DELOVNE HIPOTEZE.....	2
1.3 CILJ RAZISKAVE.....	2
2 PREGLED LITERATURE	3
2.1 ZGRADBA LESA	3
2.2 LESENI NOSILCI	4
2.3 ZOBATI SPOJ.....	5
2.3.1 Rastne značilnosti	5
2.4 LEPILA.....	8
2.4.1 Aminoplastična lepila	9
2.4.2 MF- in MUF-lepila	10
2.4.3 Lastnosti aminoplastičnih lepil.....	10
2.4.4 Uporaba aminoplastičnih lepil	10
2.4.5 Lastnosti melamina	11
2.5 SUROVINA ZA NOSILCE.....	11
2.5.1 Fizikalne in mehanske lastnosti smrekovega lesa	12

2.6	LEPLJENI LAMELIRANI NOSILCI	13
2.7	IZDELAVA LEPLJENEGA NOSILCA	14
2.8	STRIŽNA TRDNOST	17
3	MATERIALI IN METODE	19
3.1	MATERIALI	21
3.1.1	Uporabljen les	21
3.1.2	Uporabljeno lepilo	21
3.2	METODE DELA	22
3.2.1	Časi stiskanja	22
3.3	PRIPRAVA IN IZDELAVA LAMEL	24
3.4	PRIPRAVA LEPILNIH POVRŠIN.....	24
3.4.1	Izračun količine nanosa lepila	24
3.4.2	Izračun potrebnega tlaka.....	26
3.5	ČAS UTRJEVANJA LEPILO.....	26
3.6	PRIPRAVA IN OZNAČEVANJE PREIZKUŠANCEV	27
3.7	ORODJE ZA VPETJE PREIZKUŠANCA	28
4	REZULTATI	29
4.1	STRIŽNA TRDNOST LEPILNIH SPOJEV	29
4.2	STRIŽNA TRDNOST ZA POSAMEZNO RAZMERJE MED LEPILOM IN TRDILCEM.....	30
4.3	STRIŽNA TRDNOST ZA POSAMEZNI NANOS	33
5	RAZPRAVA IN SKLEPI	36
5.1	RAZPRAVA	36
5.2	SKLEPI.....	37
6	POVZETEK.....	38
7	VIRI.....	39

ZAHVALA	41
----------------------	-----------

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Osnovne lastnosti melamin-urea-formaldehidnega lepila	21
Preglednica 2: Rok trajanja lepila in trdilca v mesecih	21
Preglednica 3: Časi stiskanja za MUF lepilo 0496/0396.....	22
Preglednica 4: Prikaz izračunanih parametrov	23
Preglednica 5: Količina lepila in trdilca za določeno razmerje in nanos.....	26
Preglednica 6: Čas utrjevanja glede na razmerje lepilne mešanice	27
Preglednica 7: Povprečne vrednosti strižne trdnosti, sile loma in časa do loma	29

KAZALO SLIK

Slika 1: Prečni prerez.....	3
Slika 2: Radialni prerez	3
Slika 3: Tangencialni prerez	4
Slika 4: Slika zobatega spoja	5
Slika 5: Popolna kolesivost	8
Slika 6: Usmerjenost letnic odvisna glede na uporabo nosilca	15
Slika 7: Skica preizkušanca za strižni test	17
Slika 8: Shematski prikaz raziskovalnega dela	20
Slika 9: Skica treh debelinsko zlepljenih desk, dolžine 600 mm in širine 120 mm	24
Slika 10: Tehnica, za tehtanje lepilne mešanice	25
Slika 11: Preizkušanci velikosti 40x40 mm, z oznakami	28
Slika 12: Strižni stroj z vpetim obdelovancem.....	28
Slika 13: Povprečna vrednost strižne trdnosti vseh preizkušancev	30
Slika 14: Strižna trdnost lepilnih spojev za razmerje 100/20 glede na različne nanose	30
Slika 15: Strižna trdnost lepilnih spojev za razmerje 100/35 glede na različne nanose	31
Slika 16: Strižna trdnost lepilnih spojev za razmerje 100/60 glede na različne nanose	32
Slika 17: Strižna trdnost lepilnih spojev za razmerje 100/100 glede na različne nanose	32
Slika 18: Strižna trdnost za nanos 250 g/m^2 z različnimi razmerji.....	33
Slika 19: Strižna trdnost za nanos 300 g/m^2 z različnimi razmerji.....	34
Slika 20: Strižna trdnost za nanos 350 g/m^2 z različnimi razmerji.....	34
Slika 21: Strižna trdnost za nanos 400 g/m^2 z različnimi razmerji.....	35

1 UVOD

Lepljenje je tehnika, s katero je želel človek izboljšati lastnosti nekaterih stvari ali pa jih preprosto povezati skupaj. Les so začeli lepiti zaradi omejenosti v dimenzijah, zaščite lesa, oplemenitenja lesa, izboljšanja mehanskih lastnosti, izboljšanja dimenzijskih lastnosti, oblikovanja, konstrukcijskih povezav, izdelave lesnih kompozitov itd. (Šernek, 2013).

Les lahko lepimo na različne načine, ploskovno, vzdolžno in širinsko. Vsako lepljenje uporabljamo v različne namene. Vzdolžno lepimo deske med seboj, da dosežemo daljše lamele, ki jih lahko uporabljamo v proizvodnji nosilcev. Širinsko lepimo deske, da preprečimo krivljenje lesa in da dobimo širše sortimente za pohištvo. Z debelinskim lepljenjem pa pridobimo trdnostne lastnosti. Uporablja se v industriji nosilcev in okenskih ter vratnih profilih. V raziskavi za diplomski projekt smo se osredotočili na debelinsko lepljenje in strižno trdnost lepilnih spojev.

Na lepljenje lesa vpliva kar nekaj dejavnikov, kot so: vrsta lesa, gostota, vlažnost, napake, usmerjenost vlaken. Vsakega izmed teh dejavnikov moramo dobro poznati in jih upoštevati, če želimo doseči najboljše možne rezultate. Prvi dejavnik, tj. vrsta lesa, je lahko odličen vodič pri sami uporabi. To pomeni, da bi lahko smreko kot eno izmed najbolj priljubljenih vrst lesa pri nas uporabili za stavbno pohištvo, kot so okna, vrata, ostrešja, nosilci. Na mehanske lastnosti lesa vpliva predvsem gostota. Trdnost lesa se z gostoto povečuje, če pogledamo vlažnost, pa je ravno obratno. Les izgublja svojo trdnost s povečevanjem vlažnosti. Prav tako lahko rečemo, da se lesu zmanjšuje trdnost v prečni smeri, kar pomeni, da lahko vzdolžno orientirane deske dosežejo večkratno trdnost v primerjavi z deskami, ki so prečno usmerjene. Tudi napake imajo zelo veliko vlogo, ko govorimo o trdnosti lesa in posledično zlepljenega elementa. Vedeti moramo, katere napake lahko močno ogrozijo trdnost zlepljenega elementa. Napake so lahko: prevelike ali izpadle grče, diskoloriran les, razpoke, zavita rast, belo-rjava trohnoba ...

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

V tehnološkem postopku lepljenja imajo lahko podjetja veliko problemov s kakovostjo lepljenja, ki so povezani bodisi s količino nanosa lepila ali z ustreznim razmerjem med lepilom in trdilcem v lepilni mešanici. Zato smo se usmerili v proučevanje strižne trdnosti

lepilnega spoja, kjer smo variirali ta dva parametra. Nanos lepilne mešanice pa je bil 250 g/m^2 , 300 g/m^2 , 350 g/m^2 in 400 g/m^2 . Razmerja lepila in trdilca pa so bila 100 : 20, 100 : 35, 100 : 60 in 100 : 100. Nanos lepilne mešanice in razmerje komponent lepilne mešanice sta zelo pomembna dejavnika v procesu lepljenja. Zato smo se osredotočili na ugotavljanje najbolj optimalnega nanosa in razmerja med lepilom in trdilcem.

1.2 DELOVNE HIPOTEZE

Predvidevamo, da se pri proučevanih različnih nanosih ne bi smela poznati velika razlika v strižni trdnosti, kajti ob stiskanju pride do izrivanja odvečnega lepila, kar posledično privede do približno enake količine lepila v spoju. Predpostavljamo, da razmerje med lepilom in trdilcem ne bo bistveno vplivalo na trdnost lepilnega spoja, bo pa imelo vpliv na hitrost utrjevanja in s tem na čas lepljenja. Na podlagi rezultatov bomo lahko predvideli mejni nanos in razmerje komponent, ki ga podjetje še lahko uporablja, da doseže zahtevano trdnost lepilnih spojev, ki jo predpisuje standard.

1.3 CILJ RAZISKAVE

Cilj projekta je bil ugotoviti, pri katerem nanosu oziroma katerem razmerju lepila in trdilca dobimo najboljše rezultate. Preizkuse smo delali z dvokomponentnim melamin-urea-formaldehidnim lepilom, ki se uporablja v proizvodnji nosilcev. Ugotovitve smo primerjali še z drugimi parametri, kajti v primeru proizvodnje so zelo pomembni tudi stroški, ki so povezani s samim nanosom in deležem trdilca v lepilni mešanici.

2 PREGLED LITERATURE

2.1 ZGRADBA LESA

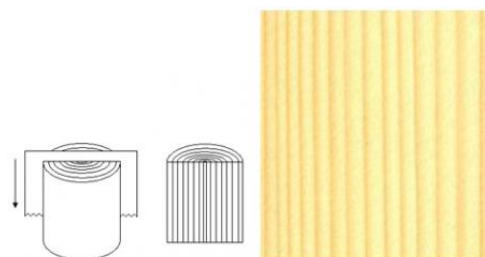
Poleg kamna in gline je les naraven material, ki ga človek izkorišča že več kot 1000 let. Človeku je les zagotavljal kurjavo in služil kot orodje in orožje. S človekovim razvojem pa se je začela razvijati tudi uporabnost lesa. Postopoma se je začela uporaba lesa za pohištvo, transport tako na kopnem kot na vodi, grajenje mostov, cerkva itd.

Les je glavno prevodno in mehansko tkivo dreves. Nastaja z delitvijo celic na notranji strani kambija. V normalnih razmerah nastane vsako leto širša ali ožja plast lesa, ki ima na prečnem prerezu obliko kolobarja. Govorimo o enoletnem prirastnem kolobarju ali braniki. Zaradi značilne rasti v višino in debelino ima les zelo pestro zgradbo, ki jo opazujemo na treh osnovnih prerezih. To so:

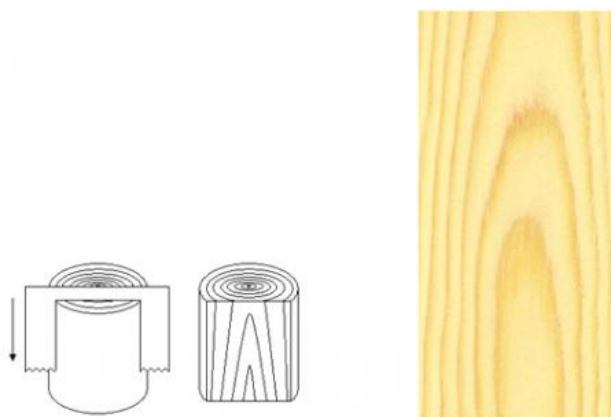
- prečni prerez (Slika 1), ki ga dobimo, ko les prežagamo prečno na vzdolžno os;
- radialni prerez (Slika 2), ki ga dobimo, ko les prerežemo vzdolžno v smeri premera (polmera);
- tangencialni prerez (Slika 3), ki ga dobimo, ko les prerežemo bočno v vzdolžni smeri.



Slika 1: Prečni prerez (Prerezi in teksture podrobno, 2015)



Slika 2: Radialni prerez (Prerezi in teksture podrobno, 2015)



Slika 3: Tangencialni prerez (Prerezi in texture podrobno, 2015)

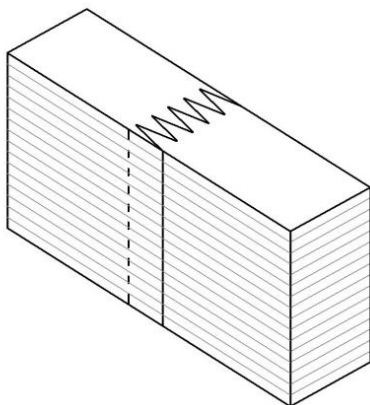
Poznavanje zgradbe lesa je nujno, saj so celice osnovni gradbeni elementi lesa. S svojimi dimenzijami in obliko, debelino celične stene ter razporeditvijo znotraj branike odločilno vplivajo na številne lastnosti, način obdelave in uporabnost lesa. Raznolikost lastnosti uvršča les med najbolj žlahtne in tople materiale, ki jih človek uporablja že dolga tisočletja. Vsaka posamezna drevesna vrsta ima značilno zgradbo, vendar tudi med drevesi iste vrste zasledimo manjše ali večje razlike. Pravimo, da je les zelo variabilen material (Čermak, 1998).

2.2 LESENI NOSILCI

Nosilec je eden izmed najpomembnejših konstrukcijskih elementov. Nosilci prevzamejo obtežbo in jo prenašajo skozi zidove in stebre na temeljna tla. Skozi človeško zgodovino so se skozi tisočletja uporabljali leseni nosilci – tramovi. Prve sledi lepljenega lesa segajo že v egipčansko kulturo. Kot prva lepljena konstrukcija iz slojnega lesa velja hala kralja Edwarda Collegeja iz leta 1860 (Dukarič, 2011). Lepljeni nosilci imajo estetski izgled, lahko premoščajo velike razpone (do 200 m). Imajo odlične odpornostne lastnosti na ogenj, saj prevajajo toploto 300- do 400-krat počasneje kot jeklo. Lepljeni nosilci obdržijo osnovne karakteristike lesa in so lep, kakovosten ter trajen izdelek. Za izdelavo lepljenih nosilcev se uporablja kakovosten, posušen les, katerega vlažnost je okoli 15 %. Omenjena vlažnost zagotavlja, da lepljenih nosilcev ni treba dodatno ščititi s kemijskimi premazi. Ker je les primerno osušen, ne prihaja do površinskih razpok. Nosilci so zlepljeni z brezbarvnim lepilom tako, da so spoji skoraj neopazni (Dukarič, 2011).

2.3 ZOBATI SPOJ

V proizvodnji lepljenih nosilcev se za dolžinsko spajanje uporablja zobati spoj (Slika 4). Deskam najprej odstranijo vse napake, ki bi vplivale na končno trdnost deske (lamele) oziroma na končno trdnost celotnega lepljenega nosilca. Končna lesena konstrukcija je obremenjena z zelo visokimi obremenitvami in silami, zato je treba biti zelo pozoren pri odstranjevanju napak. Standard, ki definira zobate spoje, je SIST EN 14080:2013. Lepljeni lamelirani nosilci se delijo na tri razrede uporabe. Prvi razred uporabe dopušča količino vlažnosti v gradbenem materialu, ki ustreza temperaturi 20 °C in relativni zračni vlažnosti (RZV), ki le za nekaj tednov v letu preseže vrednost 65 %. Drugi razred uporabe določa količino vlažnosti v gradbenem materialu, ki ustreza temperaturi 20 °C, in RZV, ki le za nekaj tednov v letu preseže vrednost 85 %. Tretji razred uporabe pa označuje klimatske pogoje z višjo vlažnostjo kot razred uporabe 2.



Slika 4: Slika zobatega spoja (Krištof, 2012)

2.3.1 Rastne značilnosti

Kakovost nosilcev se deli na dve stopnji, to sta vidna in nevidna kakovost. Samo ime kakovosti nam že pove, da bo končni izdelek viden ali neviden. Pri vidnem lepljenem nosilcu je tako treba odstraniti večje grče, smolike, predvsem pa les ne sme biti napaden od insektov in gliv. Iz lamel bodočega lepljenega nosilca je treba odstraniti rastne posebnosti, ki zmanjšujejo trdnost lesa, kot tudi značilnosti, ki kvarno vplivajo na izgled nosilca. Pri nevidnem lepljenem nosilcu, ki bo opravljal le svojo nosilno nalogo, morajo odstraniti samo tiste značilnosti, ki vplivajo na trdnost, vizualne pa niso tako pomembne, ker bodo skrite očem ljudi. V tem primeru gre lahko v nosilec tudi deska, ki je modro obarvana. Ob

napadu gliv modrivk se les obarva modro. V začetni fazi napada gliv gre bolj za vizualno napako, lahko pa se prevesi tudi v trdnostno. Torej deske, ki so modro obarvane, so lahko v nevidni kakovosti lepljenega nosilca ob pogoj, da izpolnjujejo trdnostne lastnosti.

Najpomembnejše napake, na katere moramo biti še posebej pozorni, pa naj gre za vidno ali nevidno kakovost, so kolesivost (okrožljivost), grče, naklon vlaken, razpoke, širina branik. Za lepljene nosilce moramo les razvrščati po navodilih standardov. Standarda, ki ju moramo upoštevati pri tem, sta SIST EN 14081-1 in SIST DIN 4074-1. Na podlagi teh standardov lahko razvrstimo les v tri sortirne razrede: S13, S10 in S7.

Pri skoraj 90 % žaganega lesa je vizualni razred odvisen od ocene grč. Ko razvrščamo les na podlagi izgleda v kakovostne razrede, je pomembno, kakšne so grče (zdrave, mrtve, izpadajoče, trhle), njihova razporeditev in velikost. Ko razvrščamo les po trdnosti, ocenjujemo vse vrste grč na enak način, pomembni sta samo njihova velikost in razporeditev. Glede na način razžagovanja in položaj kosa žaganega lesa v drevesu se spreminja tudi izgled grč in njihov vpliv na mehanske lastnosti žaganega lesa. Posledica prisotnosti grč je oslavljen prečni prerez žaganega lesa, močno pa lahko grče vplivajo tudi na lokalni naklon vlaken. Vpliv grč na lastnosti žaganega lesa podajamo s t. i. grčavostjo. Le-ta je v različnih pravilih razvrščanja definirana zelo različno. Podana je lahko kot razmerje med velikostjo grče in širino ploskve, na kateri se ta grča nahaja, ali pa kot razmerje med površino projekcije grče na prečni prerez in celotnim prečnim prerezom žaganega lesa. Korelacijski koeficienti med grčavostjo in upogibno trdnostjo lesa so v mejah med 0,4 in 0,76, zato morajo biti pravila vizualnega razvrščanja dokaj konservativna (Šega, 2010).

Odklon vlaken od smeri, ki je vzporedna z vzdolžno osjo žaganega lesa, je lahko posledica koničnosti hlodovine, poševnega žaganja ali pa spiralne rasti. Naklon vlaken močno vpliva na mehanske lastnosti lesa. Smrekov žagani les, ki ima 15-odstotni naklon vlaken, dosega le še 50 % natezne trdnosti lesa z vzporednim potekom lesnih vlaken. Pri ročnem vizualnem razvrščanju lesa ugotavljamo naklon vlaken le pri razvrščanju suhega lesa (pri vlažnosti lesa manjši od 20 %), in sicer na podlagi poteka razpok ali pa z uporabo metode razenja, ki v praksi skoraj ni uporabna. Pri strojnem vizualnem razvrščanju pa se za ugotavljanje naklona vlaken v zadnjem času uveljavlja lasersko skeniranje (Šega, 2010).

Razlikujemo dve vrsti razpok. V prvo skupino sodijo razpoke zaradi udara strele in kolesivosti (krožne razpoke v deblu), ki je pogosta zlasti pri jelki. Le-te lahko zasledimo že na hlodovini, na konstrukcijskem žaganem lesu pa niso dovoljene. V drugo skupino sodijo razpoke, ki nastanejo med sušenjem lesa in praviloma potekajo v radialni smeri – proti strženu. Razpoke zmanjšujejo »koristno« širino upogibno obremenjenih nosilcev, zaradi česar je zmanjšana njihova strižna trdnost. Ker razpoke nastanejo šele med sušenjem, tega kriterija v primeru, ko razvrščamo sveže žagan les, ne moremo upoštevati (Šega, 2010).

Gostota lesa močno vpliva na trdnost lesa. Pri vizualnem razvrščanju gostote lesa ne merimo, pač pa jo skušamo oceniti posredno z merjenjem širine branike. Le-ta je definirana kot velikost branike, merjena v radialni smeri. Branika je sestavljena iz ranega in kasnega lesa, njena širina je lahko zelo različna in je odvisna od drevesne vrste, kakovosti tal, klimatskih pogojev, starosti drevesa in gozdno-gospodarskih ukrepov. Z naraščanjem širine branike praviloma pada gostota in z njo praviloma tudi elastomehanske lastnosti lesa. Povezava med širino branike in gostoto je močno odvisna od področja, kjer drevo raste. Tako imata lahko les iz gorskih območij in skandinavski les kljub temu da imata ozke branike, relativno nizko gostoto (Šega, 2010).

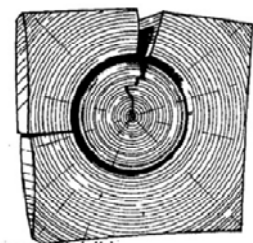
Kolesivost je razpokanost, ki poteka po letnici. Praviloma se pojavi v spodnjem delu debla zaradi prevelikih napetosti med branikami. Pogosta je pri jelki, hrastu, domačem kostanju, jesenu in topolu, opazimo pa jo šele, ko drevo posekamo.

Ločimo:

- popolno kolesivost in
- delno kolesivost.

Popolna kolesivost (Slika 5) je odstopanje lesa po celotni letnici. Značilna je za starejša debla s pravilnim prečnim prereзом (iglavci). O delni kolesivosti pa govorimo, če odstopi les le po delu letnice. Najbolj pogosto se pojavi pri deblih z nepravilnim prečnim prereзом. Kolesivost je huda napaka, ker zmanjšuje tehnične lastnosti lesa (predvsem

mehanske), pri žaganju hlodov dosežemo majhen izkoristek, pogosto pa je les uporaben le za izdelavo sekancev (Čermak, 1998).



Slika 5: Popolna kolesivost (Čermak, 1998)

2.4 LEPILA

Vsestransko uporabo lesenih kompozitov je omogočil razvoj sintetičnih lepil. Zahteve, ki jih morajo konstrukcijska lepila izpolnjevati, podaja standard SIST EN 301. Z lepljenjem naj bi dosegli spoje, ki bi imeli trdnost enako trdnosti lesa ali večjo. Večina lepil za les tudi dejansko lahko tvori spoje, ki dosegajo oziroma celo presegajo trdnost lesa.

Najpogostejše zahteve za lepila v lesarstvu so (Ščernjavič, 2008):

- lepilo mora biti odporno na temperaturo,
- lepilo mora biti odporno na klimatske spremembe,
- lepilo mora biti odporno na kemikalije,
- lepilo mora biti odporno na kemijske vplive,
- lepilo mora biti odporno na mikroorganizme,
- lepilo mora biti odporno na anorganske in organske snovi,
- lepilo mora biti odporno na insekte, glive, svetlobo, mraz, staranje,
- lepilo mora biti ognjeodporno,
- lepilo mora biti odporno na vlago in vodo,
- lepilo mora biti enostavno za pripravo in uporabo,

- lepilo mora biti poceni, lepljenje pa ekonomično,
- lepilo mora imeti čim daljšo dobo skladiščenja,
- lepilo mora imeti ustrezen odprti in zaprti čas lepljenja,
- lepilo mora imeti različne hitrosti utrjevanja,
- lepilo mora imeti ustrezno vezivno trdnost,
- lepilo mora dajati kakovostne spoje,
- lepilo ne sme biti zdravju škodljivo,
- lepilo ne sme biti ekološko oporečno.

2.4.1 Aminoplastična lepila

Aminoplastična lepila so polimerni produkti, ki nastanejo pri reakciji med spojinami z aminoskupinami (NH_2) in aldehydom. Najpogosteje uporabljeni komponenti z aminoskupino sta urea (sečnina oz. karbamid) in melamin, medtem ko je glavna aldehydna komponenta fermaldehyd. Najpomembnejša aminoplastična lepila v lesni industriji so urea-formaldehidna (UF) in melamin-formaldehidna (MF) lepila.

Nizko odpornost UF-lepil proti hidrolizi lahko izboljšamo z dodajanjem različnih deležev melamina. Zaradi visoke cene melamina se v praksi čista MF-lepila redko uporabljajo za lepljenje lesa. Glavno vodilo pri sintezi MUF-lepil v proizvodnji je, da vedno uporabijo samo toliko melamina, kot je potrebno, vendar najmanj, kot je možno. Odstotek melamina v MUF-lepilih navadno variira med nekaj odstotki in 25 odstotki. Že majhni deleži melamina UF-lepilom izjemno izboljšajo strižno trdnost lepilnega spoja in njegovo odpornost proti vodi (Šernek in Kutnar, 2009).

2.4.2 MF- in MUF-lepila

Melamin-formaldehidno (MF) in melamin-urea-formaldehidno(MUF) lepilo sta med najpogostejše uporabljene lepila za lesne plošče za zunanjo uporabo in za pripravo in lepljenje tako nizko kot visokotlačnih papirnih laminatov in prevlek. Prav tako pa se uporablja za lepljene nosilce. Večja odpornost na vodo je glavna značilnost, ki jih loči od urea-formaldehidnega (UF) lepila. MF-lepila so draga, zato so MUF-smole, ki so cenejše, z dodatkom večje ali manjše količine sečnine bolj pogosto uporabljene (Šernek in Kutnar, 2009).

2.4.3 Lastnosti aminoplastičnih lepil

Široka uporaba aminoplastičnih lepil v lesni industriji je posledica številnih prednosti, ki jih imajo ta lepila. Predvsem je razširjeno UF-lepilo, ki ima nizko ceno, odlikujejo pa ga enostavna uporaba, trdni lepilni spoji, brezbarvnost lepilnega spoja in možnost modificiranja z drugimi lepili. UF-lepilo je duromerno in zaradi visoke vsebnosti dušika nevnetljivo. Glavna pomanjkljivost UF-lepil je reverzibilnost aminometilenske vezi (zaradi njene občutljivosti na hidrolizo), kar znižuje njihovo vlagooodpornost in vodoodpornost ter povzroča emisije prostega formaldehida. Dodajanje MF- ali MUF-lepil UF-lepilu poveča njegovo vlagooodpornost in vodoodpornost, pri čemer je stopnja odpornosti odvisna od količine melamina v mešanici. Trdnost MF- in MUF-lepilnih spojev pa je odvisna od sestave lepila, dodanih katalizatorjev in parametrov lepljenja. Trdnostne in trajnostne lastnosti MF-lepil so primerljive z lastnostmi FF-lepil (Šernek in Kutnar, 2009).

2.4.4 Uporaba aminoplastičnih lepil

V zadnjih letih se v proizvodnji lesnih plošč uporablja predvsem modificirana MUF-lepila z minimalnimi deleži melamina, ki bistveno izboljšajo trajnost in vlagooodpornost ter znižajo emisije prostega formaldehida iz lesnih plošč. MUF-lepila se zaradi odlične vodoodpornosti uporabljajo za lepljenje vodoodpornih ivernih in vezanih plošč ter lepljenje nosilcev. Ker je melamin zelo drag, se čista MF-lepila uporabljajo le v specialne namene; lepljenje dekorativnega furnirja za zunanjo uporabo (vrata in čolne). UF- in MF-lepila se

pogosto uporabljajo tudi za impregniranje papirja, namenjeno za oblaganje ivernih in MDF-plošč (Šernek in Kutnar, 2009).

2.4.5 Lastnosti melamina

Lastnosti melamina so naslednje (Pori, 2010):

- molska masa je 126,13 g/mol;
- specifična gostota je 1,573 g/cm³;
- masna gostota je 650–750 kg/m³;
- je bel prah, ki se nahaja v različno finih oblikah: od nekaj mikrometrov do nekaj sto mikrometrov;
- tališče je 354 °C;
- sublimira pod točko tališča, to je pri okrog 300 °C, kjer razpade z izhajanjem amonijevih hlapov;
- toksičnost je rahla do nizka;
- stabilnost je dobra;
- netopen je v večini organskih topil;
- v vodi je slabo topen, saj se topi: v 100 ml pri 20 °C je topnost 0,38 g, pri 90 °C pa 3,7 g.

2.5 SUROVINA ZA NOSILCE

Najbolj pogosta surovina, ki jo uporabljajo v proizvodnji lesenih lepljenih nosilcev, je smrekovina. Smreka (*Picea abies* K) je vednozelen iglavec s posamično spiralno nameščenimi iglicami na vejah in z visečimi storži. Ima koničasto krošnjo in plitev, široko razprostrt koreninski sistem. Skorja do 1,5 m debelega stebla je rdečkasta do sivo rjava, lušči se v okroglih luskah. Iglice so štirirobne, bleščeče zelene, bodičasto zašiljene. Cvetovi so enodomni, moški v jagodastih, rdečih, pozneje rumenih mačicah, ženski cvetovi so v škrlatno rdečih do zelenih, pokončnih storžih, zreli storži so rjavi, viseči, semena jajčasta z zasukano konico. Les je večinoma rumenkasto bel, lahko tudi rdečkasto toniran. Je lahek (0,3–0,65 g/cm³), prožen, zelo odporen in se dobro obdeluje. Uporablja se

v visokih gradnjah, kot jamski les, v mizarstvu, papirni industriji in deloma tudi za glasbila (Wolfgang, 2002).

2.5.1 Fizikalne in mehanske lastnosti smrekovega lesa

- Gostota

Gostota domače smreke se giblje pri absolutno suhem lesu med 300 in 640 kg/m³. Seveda se gostota z večanjem vlažnosti povečuje. Gostota pri lepljenih nosilcih je odvisna od števila slojev, tlaka stiskanja pri lepljenju in dodatnega lepila. Za izračunavanje uporabljamo povprečno gostoto smrekovega lesa 430 kg/m³ (Zajc, 2005).

- Krčenje in nabrekanje

To je značilna lastnost lesov, da je sprememba dimenzije odvisna od spremembe vlažnosti lesa v higroskopskem območju 0–30 %. Sprememba dimenzije je odvisna od velikosti spremembe vlažnosti, od drevesne vrste in zgradbe lesa ter je različna v vzdolžni, radialni in tangencialni smeri. Velikost krčenja smreke je 0,3 % vzdolžno, 3,6 % radialno in 7,4 % v tangencialni smeri. Eden od razlogov za lepljenje nosilcev je tudi zmanjšanje delovanja lesa (Zajc, 2005).

- Toplotna prevodnost

Les je slab prevodnik toplote, kar pomeni, da se počasi segreva, vendar počasi tudi ohlaja. Prav zaradi te lastnosti spada v tople materiale, kar izkoriščamo pri gradnji lesenih hiš, v katerih je poleti prijetno hladno, pozimi pa toplo. Uporabljamo ga kot toplotni izolator za lesene pode (parket in ladijski pod spadata v skupino toplih talnih oblog), stenske obloge, kuhalnice, lesene ročaje ipd.

Toplotna prevodnost ni pri vseh lesovih enaka: raste z gostoto in vlažnostjo lesa. Koeficient toplotne prevodnosti λ (W/mK) za smreko je 0,14 (Čermak, 1998).

- Gorenje

Vnetljivost je odvisna od lesne vrste, gostote in vlažnosti. Lažji lesovi so lažje vnetljivi, ker so boljši toplotni izolatorji in je pri segrevanju odvajanje toplote slabše. Pri gorenju lesa se na površini oblikuje sloj oglja, ki gorenje zavira in preprečuje prodiranje ognja v globino. Pri dimenzioniranju inženirskih konstrukcij je treba v ta namen povečati izračunane prereze (Zajc, 2005).

- Električna prevodnost

Prevodnost za električni tok je odvisna od drevesne vrste, gostote, smeri prevajanja in predvsem od vlažnosti lesa. Suh les slabo prevaja elektriko, s povečanjem vlažnosti pa prevodnost narašča, vendar le do točke nasičenja celičnih sten. Nad to točko je vpliv vlage na električno prevodnost nepomemben. Suh les je dober izolator, kar izkoriščamo pri uporabi drogov za električne napeljave. Na principu merjenja upornosti lesa za prevajanje elektrike so izdelani uporovni vlagomeri, s katerimi ugotavljamo vlažnost lesa (Čermak, 1998).

- Natezna trdnost

Natezna trdnost smrekovega lesa je $40\text{--}240\text{ N/mm}^2$ in je 2- do 2,5-krat večja kot tlačna trdnost. Ta lastnost je predvsem odvisna od smeri delovanja sile glede na rast lesa. Vpliv vlažnosti na natezno trdnost je razmeroma majhen (Zajc, 2005).

- Upogibna trdnost

Upogibna trdnost smrekovega lesa je $30\text{--}70\text{ N/mm}^2$ in je predvsem odvisna od vlažnosti lesa in smeri delovanja sile (Zajc, 2005).

2.6 LEPLJENI LAMELIRANI NOSILCI

Kakovost zlepljenosti lepljenega nosilca preizkušamo s preizkusom trdnosti zobatih spojev in s preizkusom strižne trdnosti. Za preizkus zobatih spojev mora podjetje trikrat na dan vzeti lamele iz proizvodnje in jih testirati. Lamele morajo biti izbrane naključno.

Pri strižnem preizkusu iz nosilca izžagamo letev, tako da vanjo zajamemo celoten prerez nosilca. Po uravnovešanju preizkušancev v standardni klimi (20/65) izvedemo strižni preizkus, izmerimo silo in delež loma po lesu ter izračunamo strižno trdnost (Šega, 2005).

2.7 IZDELAVA LEPLJENEGA NOSILCA

Izdelava lepljenega nosilca se začne pri izboru lesa. V večini evropskih držav so na voljo naslednje primerne vrste lesa: smreka (*Picea abies*), jelka (*Abies alba*), rdeči bor (*Pinus sylvestris*), douglazija (*Pseudotsuga menziesii*). Za izdelavo lepljenega nosilca se uporablja še naslednje vrste lesa: korziški bor in avstrijski črni bor (*Pinus nigra*), macesen (*Larix decidua*), obmorski bor (*Pinus pinaster*), topol (*Populus robusta*, *Populus alba*), sitka smreka (*Picea sitchensis*), zahodna cedra (*Thuja plicata*). Navadno se izbira med lesovi iglavcev. Les mora biti posušen na približno 12 %, kajti s tem preprečimo napad gliv in insektov. Posamezne deske pripravimo za vzdolžno lepljenje, to pomeni, da jim predhodno odstranimo napake. Deskam naredimo zobati spoj in jih nato zlepimo skupaj. Lamelam, ki so širše od 200 mm, moramo narediti razbremenilni utor, katerega širina ne sme presegati 4 mm in globine 1/3 lamele. Spojene deske razžagamo na želeno dolžino, ki jo zahteva nosilec (SIST EN 14080, 2013).

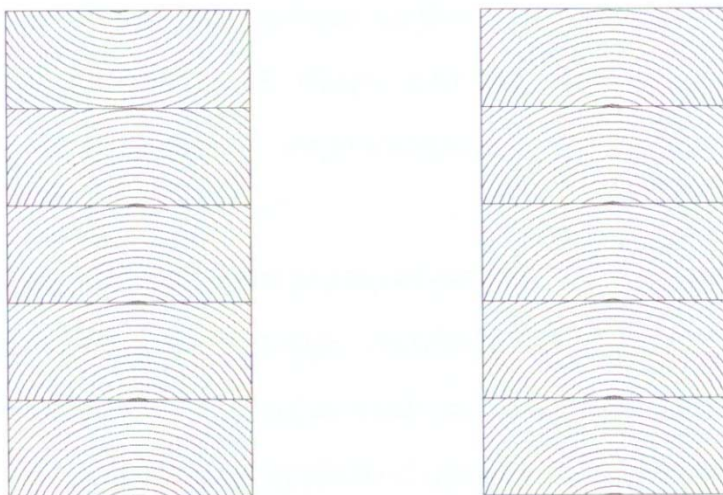
- Priprava

Lamele nato poskobljamo na štiristranskem skobeljnem stroju z vseh štirih strani na en centimeter nadmere končnega nosilca. Skobljanje poteka tik pred lepljenjem oziroma maksimalno 24 ur pred njim. Skobljanje več kot 24 ur pred lepljenjem pa nam dovoljujejo le lesna vrsta in pogoji skladiščenja. To je zelo pomembno, saj mora biti površina čista in gladka, kajti vsaka napaka, ki se zgodi na površini, lahko vpliva na kakovost zlepljenosti.

- Lepljenje

Ko lamele poskobljamo, sledi lepilna postaja, kamor nanesimo lepilo na lamelo. Nanos poteka v nitkah in v zaporedju, naprej trdilec in nato lepilo. S tem dosežemo, da se lepilo in trdilec zmešata med seboj, kar ustvari trden lepilni spoj med dvema lamelama. Nanos lepila je med 330 in 420 g/m², odvisno od časa stiskanja. Pri daljšem času stiskanja je

nanos večji tako, da kasneje začne utrjevati. Usmerjenost letnic je odvisna od uporabe končnega nosilca. V primeru, da se nosilec uporablja za mostove, pokrite bazene, torej v okolju s povišano vlažnostjo, mora biti zadnja deska obrnjena tako, da je potek branik obrnjen navzven (Slika 6 levo), v primeru, da se nosilec uporablja v okolju s standardno klimo, pa morajo biti vse letnice obrnjene v isto smer (Slika 6 desno).



Slika 6: Usmerjenost letnic, odvisna glede na uporabo nosilca

- Stiskanje

Deske oziroma lamele potujejo skozi celoten tehnološki postopek leže. Tako jih lažje obdelujemo. Deske gredo prek skobeljnega stroja in lepilne postaje, kamor smo nanесли lepilno mešanico, na ploskve lamel. V stiskalnici pa deske zložimo v nosilec in zagotovimo, da se ploskve lamel stikajo. Širina lamele nam sedaj predstavlja širino končnega nosilca, debelina lamele in število vseh lamel, zlepljenih med seboj, pa nam predstavljata višino nosilca. Stiskalnica mora zagotoviti enakomeren in zadosten tlak, ki ga predpisuje proizvajalec lepila. Tlak je odvisen od lesne vrste in od debeline lamele. Če je lamela debela manj kot 35 mm, je priporočljiv tlak med 0,6 in 0,8 N/mm². Če so lamele debele 35–45 mm in imajo utor, mora biti tlak 0,8 N/mm², brez utora pa mora biti 1 N/mm². Za lamele, debele 45–80 mm, mora biti tlak 0,8–1 N/mm². Previsok tlak lahko povzroči prevelik pritisk lamel, kar povzroči, da se lepilo iztisne iz lepilnega spoja.

Premajhen tlak pa lahko povzroči premajhen kontakt med obema lamelama, kar privede do slabega spoja (Azkonobel, 2014).

- Knjiga lepljenja

Voditi je treba knjigo lepljenja z naslednjimi podatki (SIST EN 14080, 2013):

- a) datum izdelave in številka,
- b) vrsta lesa,
- c) kakovost lesa,
- d) mere gradbenega elementa,
- e) vlažnost lesa,
- f) ura pričetka nanosa lepila,
- g) čas pričetka in konca postopka stiskanja,
- h) tlak stiskanja,
- i) smola in trdilec,
- j) količina porabljenega lepila (g/m^2),
- k) kalibracija merilca vlažnosti.

Navedena morata biti temperatura in relativna vlažnost zraka v skladišču, skladiščnem prostoru za končne spoje, v prostoru lepljenja in prostoru stiskanja.

- Kontrola kakovosti

Za izkazovanje skladnosti izdelanih elementov iz lameliranega lepljenega lesa mora proizvajalec izvajati kontrolo proizvodnje, ki mora biti dokumentirana in izvajana učinkovito, po danih postopkih in navodilih. Za vsak postopek izdelav in delovno izmeno je upogibna trdnost zobatih spojev sprejemljiva, če je dosežen eden od naslednjih pogojev (Zajc, 2005):

- za upogib velja, da ima lahko 5 kosov izmed zadnjih 100 upogibno trdnost nižjo od deklarirane, noben pa ne sme imeti trdnost nižjo od 80 % deklarirane;

- karakteristična upogibna trdnost $f_{m,15,k}$ zadnjih 15 preizkušenih zobatih spojev istega proizvodnega postopka je večja ali enaka karakteristični upogibni trdnosti spojev $f_{m,dc,k}$:

$$f_{m,15,k} \geq f_{m,dc,k}$$

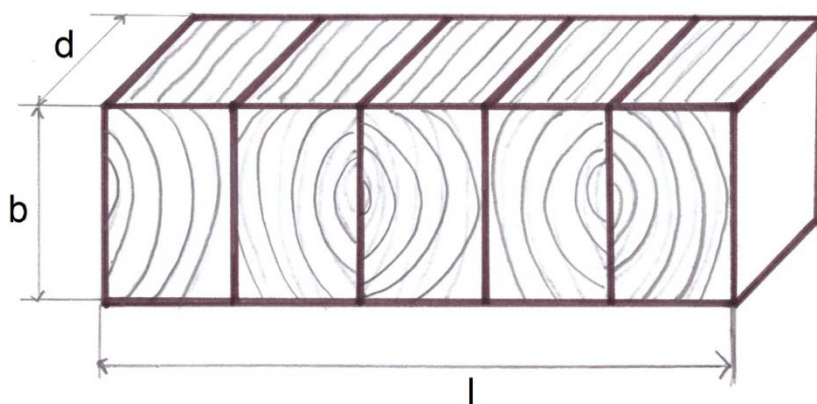
$f_{m,15,k}$ in $f_{m,dc,k}$ – določimo v skladu s standardom SIST EN 14080:2013.

Lepilni stiki se preizkusijo na preizkušancu, ki ima polni presek gradbenega elementa in je izrezan iz elementa z utrjenim lepilom. Preizkušanec se odvzame iz vsakega stiskalnega postopka oziroma na vsakih 20 m³ proizvedenega lepljenega lamelnega lesa delovne izmene, v kateri se lepi (SIST EN 14080, 2013).

2.8 STRIŽNA TRDNOST

Evropski standard SIST EN 14080, 2013, vsebuje opis postopka za določanje strižne trdnosti vzporedno z lepilnim stikom in v smeri lesnih vlaken. Pri izdelavi preizkušanca je treba paziti, da so obremenjene površine ravne, med seboj vzporedne in pravokotne na potek vlaken. Mere preizkušanca so:

- širina (b) 40–50 mm ± 1 mm,
- debelina (d) 40–50 mm ± 1 mm,
- dolžina (l) je odvisna od števila preizkušancev.



Slika 7: Skica preizkušanca za strižni test

Dolžino preizkušanca nam določa število preizkusov, ki jih bomo opravili (SIST EN 14080, 2013).

Preizkušance se označuje na lepilnem spoju. Priporoča se, da se preizkušanci odvzamejo iz polnega prečnega preseka tam, kjer je bil pri izdelavi gradbenega elementa prisoten dovolj velik tlak. V praksi pa se preizkušanci pogosto odvzamejo na koncu gradbenega elementa iz lepljenega lamelnega lesa, kjer je lahko bil tlak stiskanja neenakomeren in nezadosten. Če je dosežena zadostna strižna trdnost, je tudi kakovost lepljenega stika zadovoljiva (SIST EN 14080, 2013).

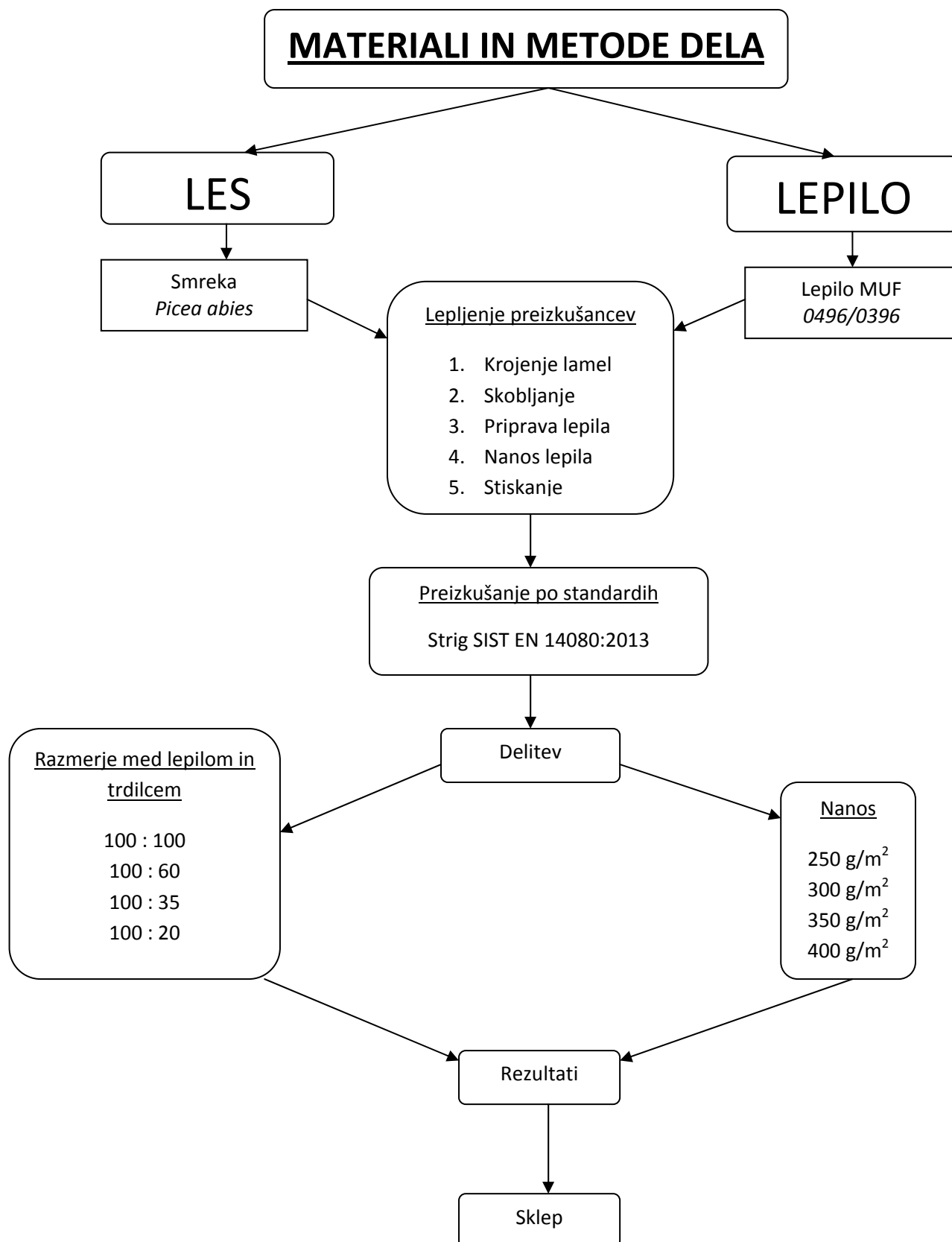
Klimatizacija preizkušanca naj poteka v normalni klimi 20/65 po standardu ISO 554, kar pomeni pri temperaturi $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ in relativni vlagi $65\% \pm 5\%$, tako dolgo, da se doseže uravnotežena vlažnost (SIST EN 14080, 2013).

Preizkušanec mora biti vstavljen v strižno napravo tako, da deluje preizkusna obremenitev vzporedno s potekom lesnih vlaken. Lepljeni stik ne sme biti oddaljen od strižne površine več kot 1 mm. Čas obremenitve preizkušanca je treba pri enakomerni hitrosti izvesti tako, da do loma ne pride prej kot v 20 s (SIST EN 14080, 2013).

3 MATERIALI IN METODE

V proizvodnji lepljenih nosilcev se uporablja lepilo, ki mora zadostiti visokim zahtevam standardov. Taka lepila pa so draga, kar podjetjem povzroča velike stroške. V tem raziskovalnem delu smo se osredotočili na proučevanje razmerja med lepilom in trdilcem v lepilni mešanici in na nanos lepila, kar bi podjetjem pripomoglo k zmanjšanju stroškov. Hoteli smo ugotoviti, kakšen nanos oziroma kakšno razmerje med lepilom in trdilcem zadostuje standardom, hkrati pa je stroškovno ugodno za podjetje.

V raziskavi smo za izdelavo lepljenih nosilcev uporabljali smrekov les. Smrekove deske smo nažagali na dolžino in jih pred vsakim lepljenjem poskobljali. Debelinsko smo zlepili po tri deske med seboj, variirali pa smo različne nanose v različnih razmerjih. Preizkušali smo nanos 250 g/m^2 , 300 g/m^2 , 350 g/m^2 in 400 g/m^2 , razmerja med lepilom in trdilcem pa so bila 100 : 20, 100 : 35, 100 : 60 in 100 : 100. Lepljene preizkušance smo klimatizirali, nato pa iz njih nažagali preizkušance.



Slika 8: Shematski prikaz raziskovalnega dela

3.1 MATERIALI

3.1.1 Uporabljen les

Uporabili smo umetno sušene 34 mm debele smrekove lamele s povprečno vlažnostjo 10 %. Lamele so bile pretežno radialne, brez večjih napak.

3.1.2 Uporabljeno lepilo

Uporabili smo lepilo proizvajalca Akzonobel. Osnovne lastnosti lepila so prikazane v Preglednici 1.

Preglednica 1: Osnovne lastnosti melamin-urea-formaldehidnega lepila

(Akzonobel, 2014)

Specifikacija produkta		
	0496	0396
produkt	melaminska smola	trdilec
stanje	tekočina	tekočina
barva	motno bela	bela
viskoznost	2000–9000 mPas	1700–2700 mPas
pH	8,5–9,3	1,3–2,0
suhi delež	pribl. 65 %	/
gostota	pribl. 1290 kg/m ³	pribl. 1070 kg/m ³

Preglednica 2: Rok trajanja lepila in trdilca v mesecih

(Akzonobel, 2014)

Rok trajanja (v mesecih)	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
0496	4	3	1,5	1
0396	4	4	3	2,5

3.2 METODE DELA

Pri preizkusu smo želeli ugotoviti, kako vpliva različen nanos lepila in različno razmerje med lepilno mešanico na strižno trdnost lepilnega spoja. Odločili smo se za štiri različne nanose lepila in za štiri različna razmerja med lepilom in trdilcem. To pomeni, da smo preizkušali šestnajst različnih skupin.

3.2.1 Časi stiskanja

Čase stiskanja smo upoštevali tako, kot jih predpisuje proizvajalec (Preglednica 3). Ker pa proizvajalec predpisuje čase stiskanja samo za dve različni mešanici lepila in trdilca, smo za naša izbrana razmerja čase stiskanja izračunali. Za mešanico 100 : 100 smo vzeli čas stiskanja 90 minut, kot ga zahteva proizvajalec. Prav tako smo za mešanico 100 : 30 vzeli čas 180 minut, kot ga zahteva proizvajalec. Nato smo izvedli linearno interpolacijo in na osnovi tega izračunali (enačbi 1 in 2) ter določili čase stiskanja za naša izbrana razmerja (Preglednica 3).

Preglednica 3: Časi stiskanja za lepilo MUF 0496/0396.

(Akzonobel, 2014)

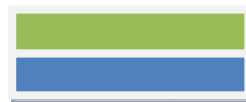
Čas stiskanja po EN302-6	Temperatura	Mešanica 100 : 30	Mešanica 100 : 100
	20 °C	3 h	1 h 30 min.

Preglednica 4: Prikaz izračunanih parametrov

Oznake	Količina lepila 0496	Količina trdilca 0396	Izračunan čas stiskanja (min.)	Izbrani čas stiskanja (min.)
a	100	20	192,86	240
b	100	30	180,00	180
c	100	35	173,57	180
d	100	60	141,43	150
e	100	100	90,00	90

Označuje podatke, ki jih navaja proizvajalec

Označuje podatke, ki nas zanimajo



Formuli za izračun časa stiskanja:

$$F = \frac{\text{čas stiskanja}(b) - \text{čas stiskanja}(e)}{\text{razmerje}(e) - \text{razmerje}(b)} \quad \dots(1)$$

$$F = \frac{180 - 90}{100 - 30} = 1,3$$

$$t [d] = (t [e]) + ((R [e] - R [d]) * faktor [F]) \quad \dots(2)$$

$$C = 90 + ((100 - 60) * 1,3)$$

Legenda:

F = faktor

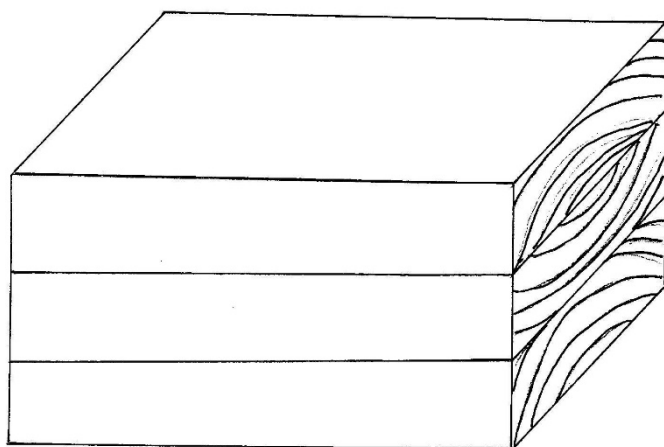
R = razmerje

a, b, c, d, e = oznake razmerij in časov stiskanja

t = čas stiskanja

3.3 PRIPRAVA IN IZDELAVA LAMEL

Za lepljenje smo uporabili smrekov les, ki smo ga vzeli iz proizvodnje lepljenih nosilcev v podjetju Hoja. Izbrali smo 48 lamel brez večjih napak. Lamele so bile dolge $60\text{ cm} \pm 1\text{ cm}$ in široke $12\text{ cm} \pm 0,5\text{ cm}$ in debele 34 mm. Lamele so predhodno že bile posušene na zahtevano vlažnost 10 %.



Slika 9: Skica treh debelinsko zlepljenih desk dolžine 600 mm in širine 120 mm

3.4 PRIPRAVA LEPILNIH POVRŠIN

Lamele smo na poravnalnem skobeljnem stroju najprej poskobljali po ploskvi, nato še po robu. Na debelinskem skobeljnem stroju smo lamele nato poskobljali na isto širino (10 cm) in končno debelino (30 mm).

3.4.1 Izračun količine nanosa lepila

Nanos lepila običajno ni težaven, vendar pride do težav, ko uporabljamo dvokomponentna lepila. V našem primeru smo testirali razmerje in nanos za dvokomponentno melamin-urea-formaldehidno lepilo. V raznih industrijskih obratih imajo različne tehnike nanosa, najbolj pogosta pa sta valjčni in polivalni stroj. V našem primeru se nismo odločili za strojno nanašanje lepila, saj so lamele premajhne. Pri pripravi mešanice smo morali biti zelo natančni. Uporabljali smo digitalno tehtnico, ki izmeri do 0,1 g natančno. Držali smo se izračunov in v čašo najprej nalili potrebno količino lepila, nato pa še trdilca.



Slika 10: Tehtnica za tehtanje lepilne mešanice

Formula:

$$S = a * b * N \quad \dots(3)$$

$$S_2 = 2 * a * b * N + d \quad \dots(4)$$

Legenda:

S = površina lamele (m^2)

a = širina lamele (m)

b = dolžina lamele (m)

N = nanos lepila (g/m^2)

d = dodatek zaradi izgub (g) (ostanek lepila na valju ali stenah posode)

Izračunali smo, da je površina dveh ploskev, na kateri nanašamo lepilo, skupno $0,144 m^2$. Količina lepilne mešanice, ki pride na obe ploskvi, pa znaša v primeru z nanosom $250 g/m^2$ 86 g, v primeru z nanosom $300 g/m^2$ 93,2 g, v primeru z nanosom $350 g/m^2$ 100,4 g in v primeru z nanosom $400 g/m^2$ 107,6 g. Pri vseh nanosih smo prišteli še dodatnih 50 g lepilne mešanice zaradi izgub. Ko govorimo o izgubah, mislimo na lepilo, ki je ostalo na valjčku oziroma na stenah posode, v kateri smo pripravljali lepilno mešanico. V Preglednici 5 je prikazano, koliko lepila in trdilca smo potrebovali za določeno razmerje.

Preglednica 5: Količina lepila in trdilca za določeno razmerje in nanos

Lepilo (g)	Trdilec (g)	Skupaj (g)	Razmerje (lepilo : trdilec)	Nanos (g/m ²)
72,3	13,7	86	100/20	250
63,7	22,3	86	100/35	250
53,8	32,2	86	100/60	250
43	43	86	100/100	250
78,3	14,9	93,2	100/20	300
69,1	24,1	93,2	100/35	300
58,3	34,9	93,2	100/60	300
46,6	46,6	93,2	100/100	300
84,3	16,1	100,4	100/20	350
74,4	26	100,4	100/35	350
62,7	37,6	100,4	100/60	350
50,2	50,2	100,4	100/100	350
90,4	17,2	107,6	100/20	400
79,7	27,9	107,6	100/35	400
67,3	40,4	107,6	100/60	400
53,8	53,8	107,6	100/100	400

3.4.2 Izračun potrebnega tlaka

Stiskanje smo opravili v hidravlični stiskalnici pri sobnih pogojih. Stiskalnico smo nastavili na minimalen tlak, in sicer 50 barov. Kljub temu je bil tlak v stiskalnici prevelik za tako majhen obdelovanec. Težavo smo rešili tako, da smo hkrati stiskali dva preizkušanca, kar je pomenilo, da se je tlak razpolovil, hkrati pa je zadoščal tlaku, ki ga predpisuje proizvajalec, in sicer 10 barov.

3.5 ČAS UTRJEVANJA LEPILA

Po končanem stiskanju smo lepljene preizkušance postavili v komoro, kjer so bili parametri nastavljeni na 23,2 °C in 50-odstotno vlažnost. S temi pogoji smo zagotovili, da

so se lepljenci uravnovesili, lepilo pa do konca utrdilo. Proizvajalec navaja različne čase utrjevanja za različna razmerja (Preglednica 6).

Preglednica 6: Čas utrjevanja glede na razmerje lepilne mešanice

(Akzonobel, 2014)

Razmerje	100 : 10	100 : 30	100 : 100
Čas utrjevanja	72 h	40 h	12 h

3.6 PRIPRAVA IN OZNAČEVANJE PREIZKUŠANCEV

Za strižni preizkus smo izžagali preizkušance velikosti 40 x 40 mm, kot zahteva standard SIST EN 14080, 2013. Iz vsakega lepljenega preizkušanca smo iz prve polovice izžagali deset preizkušancev. Označevali smo jih s črko in številko. Vsaka črka predstavlja svoje razmerje in nanos, številka pa označuje predel, iz katerega je bil preizkušanec izžagan. Tak način označevanja je zelo uporaben, saj ne moremo zamešati preizkušancev med seboj. Označevali pa smo tudi spoje. V primeru, da nam test pokaže zelo veliko odstopanje, lahko pogledamo, kateri spoj je to bil in zakaj je tako slab rezultat.

Legenda:

A, B ... P = razmerje in nanos lepilne mešanice

1, 2 ... 10 = predel, kjer je bil preizkušanec izžagan

I, II = oznaka spoja



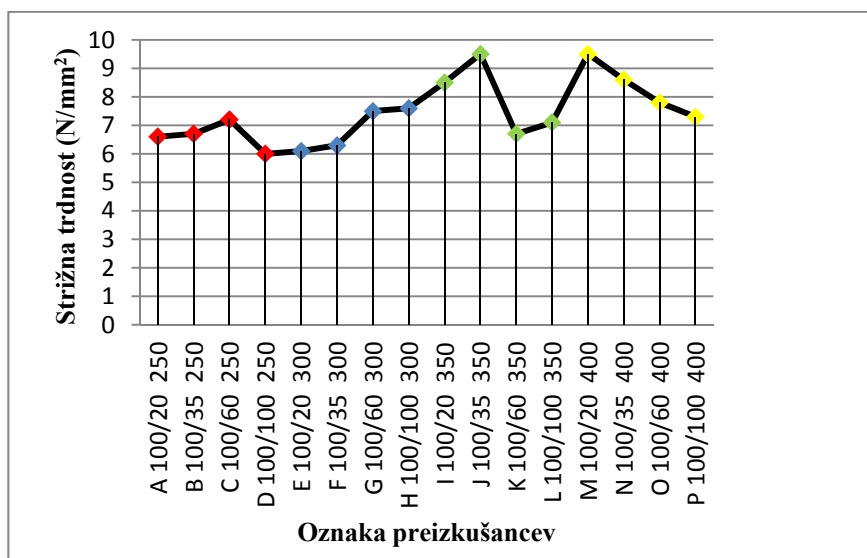
4 REZULTATI

4.1 STRIŽNA TRDNOST LEPILNIH SPOJEV

Rezultati strižne trdnosti so pokazali sprejemljive vrednosti. Standard SIST EN 14080, 2013, zahteva, da v primeru minimalno 90-odstotnega loma po lesu preizkušanece doseže strižno trdnost vsaj 6 N/mm^2 . To minimalno vrednost smo dobili pri vseh preizkušancih (Preglednica 7), poleg tega pa je bil pri vseh preizkušancih lom po lesu 100-odstoten, kar dokazuje, da je bilo lepljenje kakovostno.

Preglednica 7: Povprečne vrednosti strižne trdnosti, sile loma in časa do loma

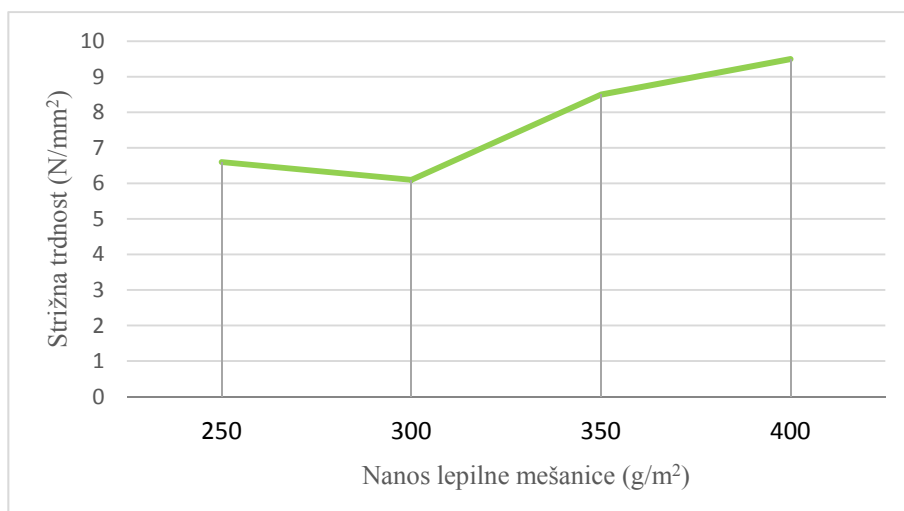
Oznaka preizkušancev	Razmerje med lepilom in trdilcem	Količina nanosa (g/m^2)	f_v (N/mm^2)	F_{loma} (N)	t_{loma} (s)
A 100/20 250	100/20	250	6,6	15.537	46
B 100/35 250	100/35	250	6,7	16.124	39
C 100/60 250	100/60	250	7,2	17.041	41
D 100/100 250	100/100	250	6,0	14.314	44
E 100/20 300	100/20	300	6,1	14.371	49
F 100/35 300	100/35	300	6,3	14.824	54
G 100/60 300	100/60	300	7,5	17.696	49
H 100/100 300	100/100	300	7,6	18.002	41
I 100/20 350	100/20	350	8,5	20.637	46
J 100/35 350	100/35	350	9,5	23.375	36
K 100/60 350	100/60	350	6,7	16.504	36
L 100/100 350	100/100	350	7,1	17.391	45
M 100/20 400	100/20	400	9,5	23.190	36
N 100/35 400	100/35	400	8,6	20.960	44
O 100/60 400	100/60	400	7,8	19.300	56
P 100/100 400	100/100	400	7,3	17.839	32



Slika 13: Povprečne vrednosti strižne trdnosti vseh skupin preizkušancev

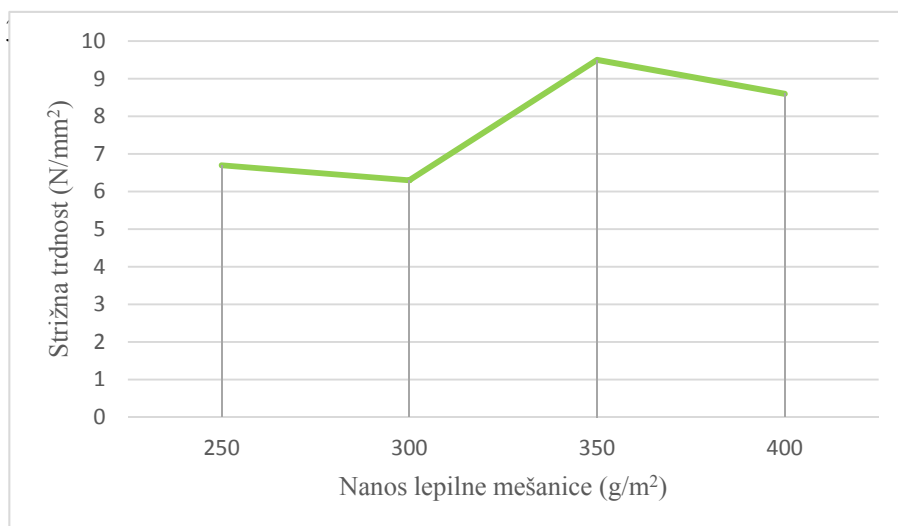
4.2 STRIŽNA TRDNOST ZA POSAMEZNO RAZMERJE MED LEPILOM IN TRDILCEM

Slika 14 prikazuje strižno trdnost lepilnih spojev za razmerje 100 : 20 pri različnih nanosih lepilne mešanice. Iz grafa je razvidno, da strižna trdnost narašča z večanjem nanosa. Pri nanosu 250 g/m^2 in 300 g/m^2 sta rezultata podobna, nato pa vidimo, da se pri nanosu 350 g/m^2 strižna trdnost poveča, prav tako pa se poveča pri nanosu 400 g/m^2 .



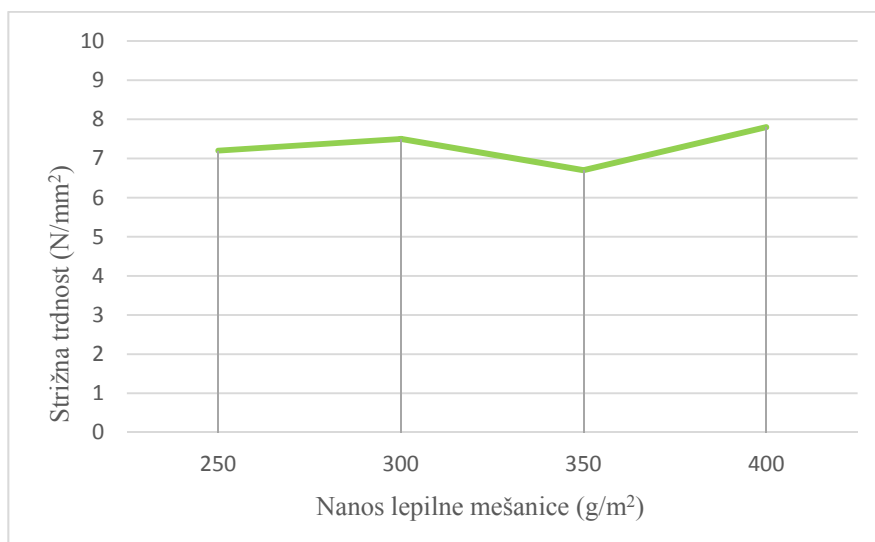
Slika 14: Strižna trdnost lepilnih spojev za lepilno mešanico z razmerjem 100 : 20 glede na različne nanose

Slika 15 prikazuje strižno trdnost za razmerje 100 : 35 pri različnih nanosih lepilne mešanice. Iz grafa je razvidno, da strižna trdnost narašča z večanjem nanosa. Pri nanosu 250 g/m² in 300 g/m² sta rezultata podobna, nato pa vidimo, da se pri nanosu 350 g/m² strižna trdnost močno poveča, nato pa se malenkostno zmanjša pri nanosu 400 g/m², vendar ne doseže nižje trdnosti kot pri nanosih 250 g/m² in 300 g/m².



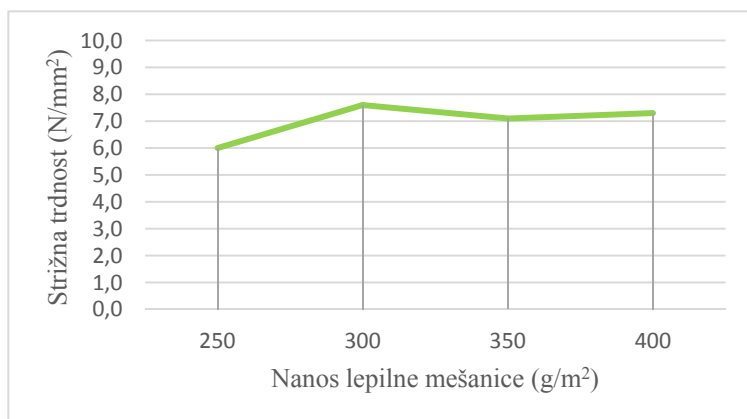
Slika 15: Strižna trdnost lepilnih spojev za lepilno mešanico z razmerjem 100 : 35 glede na različne nanose

Slika 16 prikazuje strižno trdnost za razmerje 100 : 60 pri različnih nanosih lepilne mešanice. Iz grafa je razvidno, da je strižna trdnost približno konstantna. Pri nanosu 400 g/m² je manjše povečanje trdnosti, pri 350 g/m² pa je manjše zmanjšanje strižne trdnosti, vendar statistično značilnih razlik ni.



Slika 16: Strižna trdnost lepilnih spojev za lepilno mešanico z razmerjem 100 : 60 glede na različne nanose

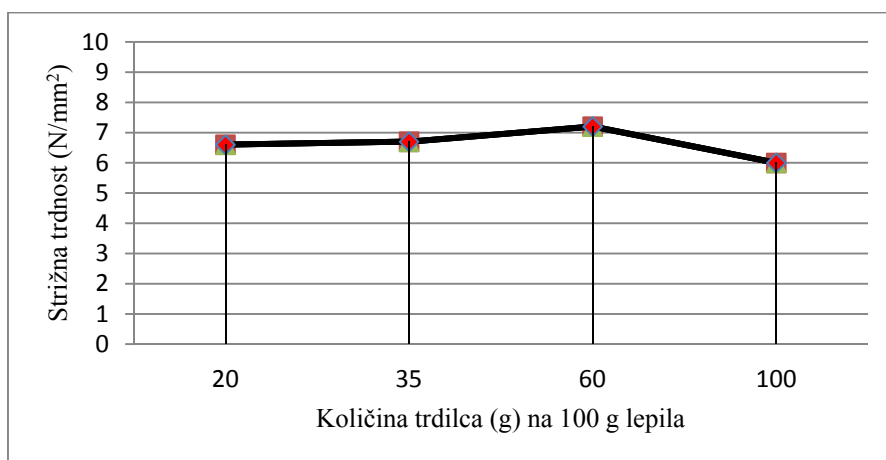
Slika 17 prikazuje strižno trdnost za razmerje 100 : 100 pri različnih nanosih lepilne mešanice. Iz grafa je razvidno, da se strižna trdnost poveča pri 300 g/m². Nato pa je trdnost približno konstantna z majhnimi odstopanji. Odstopanja pri 350 g/m² in 400 g/m² so za manj kot 0,5 N/mm². Iz grafa lahko preberemo, da se nam z večanjem nanosa lepilne mešanice strižna trdnost bistveno ne poveča.



Slika 17: Strižna trdnost lepilnih spojev za lepilno mešanico z razmerjem 100 : 100 glede na različne nanose

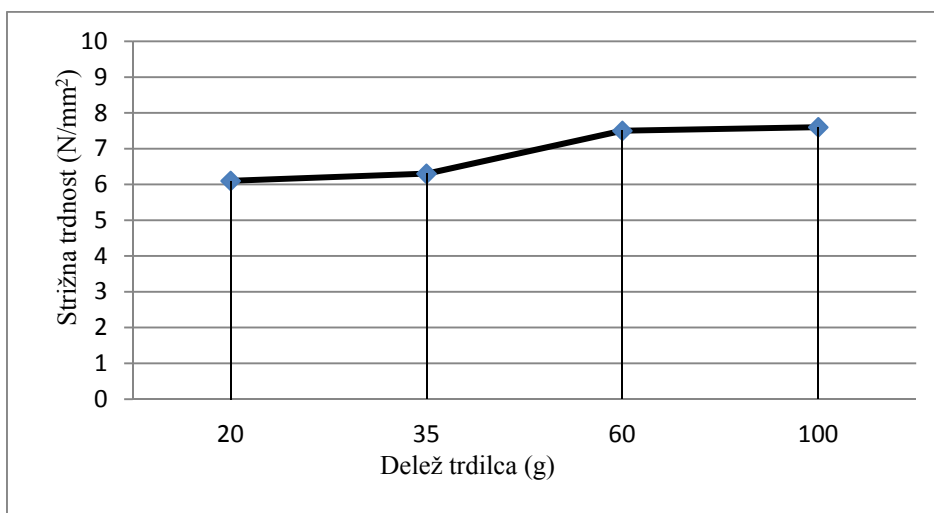
4.3 STRIŽNA TRDNOST ZA POSAMEZNI NANOS

Slika 18 prikazuje strižno trdnost lepilnega spoja za nanos 250 g/m^2 glede na različna razmerja med lepilom in trdilcem v lepilni mešanici. Vidimo lahko, da strižna trdnost rahlo narašča do razmerja 100 : 60, nato pa pri razmerju 100 : 100 pade, vendar vseeno doseže trdnost, ki jo še predpisuje standard.



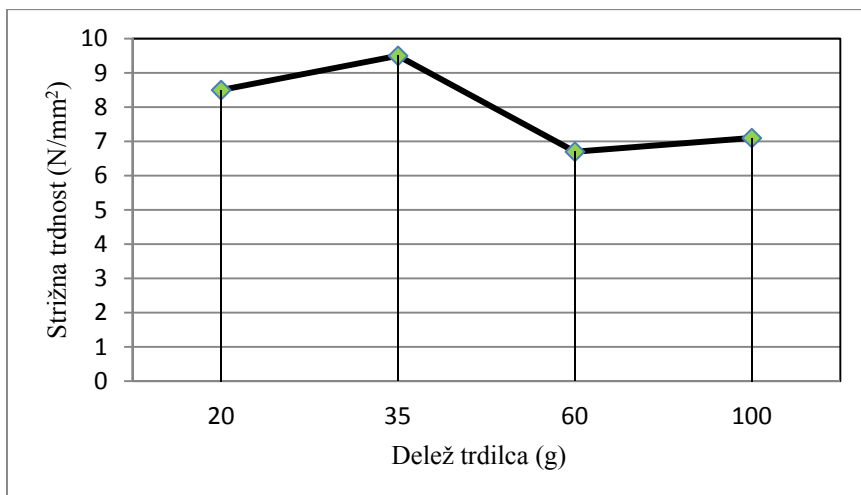
Slika 18: Strižna trdnost za nanos 250 g/m^2 za različne lepilne mešanice

Slika 19 prikazuje strižno trdnost lepilnega spoja za nanos 300 g/m^2 glede na različna razmerja med lepilom in trdilcem v lepilni mešanici. Vidimo lahko, da strižna trdnost konstantno narašča. Pri razmerju 100 : 20 smo dosegli minimalno strižno trdnost $6,1 \text{ N/mm}^2$, pri razmerju 100 : 100 pa smo dosegli $7,6 \text{ N/mm}^2$.



Slika 19: Strižna trdnost za nanos 300 g/m² za različne lepilne mešanice

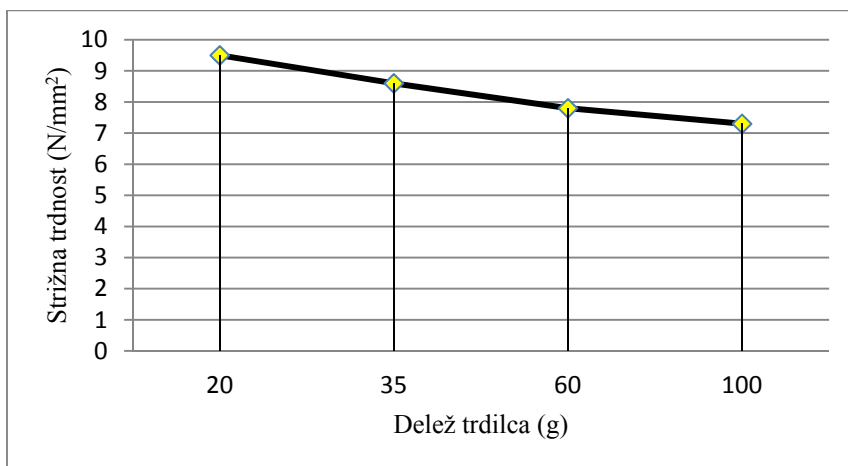
Slika 20 prikazuje strižno trdnost lepilnega spoja za nanos 350 g/m² glede na različna razmerja med lepilom in trdilcem v lepilni mešanici. Vidimo lahko, da ima strižna trdnost najvišje vrednosti pri manjših razmerjih. Pri razmerju 100 : 20 smo dosegli strižno trdnost 8,5 N/mm², pri 100 : 35 pa 9,5 N/mm². Iz grafa je razvidno, da strižna trdnost nato pada. Najnižjo vrednost smo dosegli pri razmerju 100 : 60, in sicer 6,7 N/mm².



Slika 20: Strižna trdnost za nanos 350 g/m² za različne lepilne mešanice

Slika 21 prikazuje strižno trdnost lepilnega spoja za nanos 400 g/m² glede na različna razmerja med lepilom in trdilcem v lepilni mešanici. Vidimo lahko, da strižna trdnost konstantno pada do razmerja 100 : 100. Najvišjo strižno trdnost smo dosegli pri razmerju

100 : 20, in sicer $9,5 \text{ N/mm}^2$. Najnižjo vrednost pa smo dosegli pri razmerju 100 : 100, in sicer $7,3 \text{ N/mm}^2$.



Slika 21: Strižna trdnost za nanos 400 g/m^2 za različne lepilne mešanice

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

V raziskovalnem delu smo želeli ugotoviti, kakšen nanos in katero razmerje med lepilom in trdilcem je optimalno za proizvodnjo lepljenih nosilcev. Preizkušali smo melamin-urea-formaldehidno lepilo. Za testiranje smo pripravili šestnajst različnih skupin preizkušancev. Izbrali smo štiri različne nanose in z vsakim nanosom štiri različna razmerja. Proizvajalec priporoča nanos med 250 in 350 g/m², nas pa je zanimalo, ali pri nižjih nanosih prav tako lahko pridemo do dobrih rezultatov oziroma do rezultatov, ki še zadostujejo standardom.

Kadar lepilo opravi svojo funkcijo, na ugotovljeno strižno trdnost vplivajo predvsem lastnosti lesa. Les ima mehanske lastnosti, ki so lahko dobre ali slabe. Z lepljenjem lahko slabe lastnosti odpravimo. Pri primerjavi nam Preglednica 7 prikazuje, da so vsi preizkušanci dosegli trdnost, ki jo zahteva standard. Vsi nanosi, ki smo jih proučevali, so bili čez optimalno vrednost, ki je 250–350 g/m², zato se vpliv na strižno trdnost ni pokazal. Vseeno so meritve pokazale, da nanos pri nižjih razmerjih, kot sta 100 : 20 in 100 : 35, vpliva na trdnost. Če je nanos dovolj velik, razmerje na trdnost ne vpliva veliko. Pri lepilnih mešanicah z različnimi deleži trdilca pa smo ugotovili, da je pri enakem nanosu lepila trdnost približno konstantna. Vidimo tudi lahko, da pri visokem nanosu prevelika količina trdilca celo poslabša strižno trdnost in z razmerjem 100 : 100 dosežemo nižje rezultate kot pri razmerju 100 : 20. Težavo lahko vidimo v tem, da lepilo začne utrjevati, že preden smo lepljence vstavili v stiskalnico. Vizualno smo ocenili vsak preizkušanec in ugotovili, da je povsod prišlo do 100-odstotnega loma po lesu, zato lahko predpostavimo, da je lepilo opravilo svojo nalogo, do razlik med testi pa je prišlo zaradi variabilnosti lesa.

5.2 SKLEPI

Raziskovali smo vpliv nanosa lepila in razmerja med lepilom in trdilcem na strižno trdnost lepilnega spoja. Preizkušanje strižne trdnosti za melamin-urea-formaldehidno lepilo smo izvajali po standardu SIST EN 14080, 2013, in prišli do naslednjih sklepov:

1. vsi preizkušanci so presegli minimalno strižno trdnost 6 N/mm^2 , ki jo predpisuje standard, če je lom po lesu 100-odstoten;
2. nanos lepilne mešanice vpliva na strižno trdnost pri nižjih razmerjih med lepilom in trdilcem v lepilni mešanici;
3. z večanjem nanosa lepilne mešanice se strižna trdnost ne izboljšuje, saj se odvečno lepilo iztisne iz lepilnega spoja;
4. večanje deleža trdilca ne vpliva bistveno na strižno trdnost, skrajša pa se čas lepljenja.

V nadaljnjih raziskavah bi se bilo smiselno usmeriti v ekonomske učinke lepljenja. Glede na naše ugotovitve bi lahko izračunali, kakšni so stroški za podjetje pri izbranem nanosu in razmerju. Tako bi ugotovili stroške za nabavo lepilne mešanice.

6 POVZETEK

V proizvodnji lepljenih nosilcev se uporablja lepilo, ki mora ustrezati visokim zahtevam standardov. Tako lepilo je tudi zelo drago in podjetjem povzroča velike stroške. Zato smo se odločili in naredili preizkuse, ki bodo pomagali podjetjem pri izbiri nanosov lepilne mešanice in izbiri razmerja med lepilom in trdilcem. Vse te preizkuse smo naredili z dvokomponentnim melamin-urea-formaldehidnim lepilom (0496: lepilna smola, 0396: trdilec). Testirali smo strižno trdnost po standardu SIST EN 14080, 2013.

V preizkusu smo uporabljali smrekov les. Deske so bile posušene na 10 % lesne vlažnosti. Prikrojili smo jih na dolžino in jih poskobljali na enako debelino. Končno skobljanje smo opravljali tik pred lepljenjem. Lepilno mešanico smo pripravili za vsak lepljenec posebej. S pomočjo valjčka smo lepilo nanесли na ploskev deske, hkrati pa nam je valjček zagotovil enakomerno porazdelitev lepila po površini. Deske smo debelinsko lepili po tri skupaj in jih dali v hidravlično stiskalnico. Stiskali smo po dva lepljenca hkrati pri specifičnem tlaku 10 barov. Iz lepljencev smo naredili preizkušance, kakor zahteva in je opisano v standardu SIST EN 14080, 2013. Preizkušance smo tudi označili in s tem zagotovili, da jih ne bi pomešali med seboj. Označevali smo jih s črko, ki predstavlja nanos in razmerje za določen lepljenec, in s številko, ki predstavlja položaj, iz katerega smo preizkušanec izžagali. Strižno trdnost smo ugotavljali z univerzalnim testirnim strojem. Vnesli smo podatke, kot sta širina in dolžina, stroj pa nam je izmeril maksimalno silo loma (N), strižno trdnost (N/mm^2), čas loma (s) in izrisal graf. Lom po lesu smo ocenjevali vizualno in ugotovili, da je v vseh primerih prišlo do 100-odstotnega loma po lesu, kar zagotavlja, da je lepilo kakovostno zlepilo preizkušance. Količina nanosa in razmerje med lepilom in trdilcem nista imela bistvenega vpliva na strižno trdnost. Vsi preizkušanci so presegli minimalno zahtevano strižno trdnost po standardu.

7 VIRI

Akzonobel -Productinformation 0496/0396 version 2. 2014.

<https://www.akzonobel.com/cascoadhesives>(7.jun.2015)

Čermak M. 1998. Tehnologija lesa 1. Učbenik, Ljubljana, Pami 1998 – Srednje izobraževanje. Program Lesarstvo. Predmet tehnologija: str 27-86 str.

Dukarič D. 2011. Primerjava lesenih in jeklenih nosilcev na objektu OŠ Ljudski vrt Ptuj: diplomsko delo. Višja strokovna šola Academia Maribor: 78 str.

Hoja – Lepljene konstrukcije. 2015. (27.maj.2015)

<http://www.hoja-global.com/?lang=sl>

Krištof I. 2012. Zobati spoji lameliranih lepljenih nosilnih elementov lesenih

konstrukcij: diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, konstrukcijska smer: 32 str.

Prerezi in teksture. Mizarstvo Hrovat.

<http://hrovat.net/o-lesu/teksture-lesa-in-nacini-razreza/prerezi-in-teksture-podrobno/> (2015)

Resnik J. 1989. Lepila in lepljenje lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, VTOZD z lesarstvo: 103 str.

SIST EN 14081-1:2011: Lesene konstrukcije - Razvrščanje konstrukcijskega lesa s fazonskimi kosi po trdnosti - 1. del: Splošne zahteve Timber structures – Strenght graded structural timber with rectangular crosssection - Part 1: General requirements

SIST EN 14080:2013: Timberstructures – Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements

- Ščernjavič D. 2008. Lepljen les za konstrukcijske namene: diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, oddelek za lesarstvo: 18 str.
- Šega B. 2005. Ugotavljanje kakovosti zlepljenosti lesnih tvoriv. Les, 57, 5: 148-154
- Šega B. 2010. Vizualno razvrščanje konstrukcijskega žaganega lesa. Les, 62, $\frac{3}{4}$: 96-104
- Šernek M. 2013. Lepljen les; študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 1 str.
- Šernek M., Kutnar A. 2009. Aminoplastična lepila. Aminoplastic adhesives. Les, 61, 2 : 47-53
- Wolfgang L. 2002. Leksikon rastline. Tržič, Učila International: 296 str
- Zajc A. 2005. Vpliv časa stiskanja na strižno trdnost in delaminacijo lepilnih spojev. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 6-14

ZAHVALA

Za vodenje in pomoč pri diplomskem projektu se zahvaljujem mentorju prof. dr. Milanu Šerneku in recenzentu viš. pred. mag. Bogdanu Šegi.

Za pomoč pri izdelavi preizkušancev se zahvaljujem Juretu Žigonu, mag. inž. les.

Zahvala tudi sodelavcem Katedre za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin na Oddelku za lesarstvu, ki so mi pomagali pri praktičnemu delu diplomskega projekta.

Zahvaljujem se podjetju Hoja, d. d., ki mi je zagotovilo material za preizkuse, prav tako pa mi je zagotovilo lepilo z vso dokumentacijo.

Hvala staršem in vsem prijateljem, ki so mi na kakršen koli način pomagali pri izdelavi diplomskega projekta.