

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Rok SKOK

**VPLIV SREDICE NA LASTNOSTI LAHKEGA
LESNEGA PLOŠČNEGA KOMPOZITA**

DIPLOMSKI PROJEKT

Univerzitetni študij - 1. stopnja

Ljubljana, 2016

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Rok SKOK

**VPLIV SREDICE NA LASTNOSTI LAHKEGA LESNEGA
PLOŠČNEGA KOMPOZITA**

DIPLOMSKI PROJEKT
Univerzitetni študij - 1. stopnja

**INFLUENCE OF THE CORE ON THE LIGHTWEIGHT WOOD-
BASED COMPOSITE**

B. SC. THESIS
Academic Study Programmes

Ljubljana, 2016

Diplomski projekt je zaključek Univerzitetnega študija Lesarstva – 1. stopnja. Delo je bilo opravljeno na Katedri za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Sergeja Medveda, za recenzenta pa prof. dr. Milana Šerneka.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

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

Rok Skok

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Du1
DK	UDK 630*86
KG	lahki lesni ploščni kompoziti/papirnato satovje/pena/sredica/vlaknena plošča
AV	SKOK, Rok
SA	MEDVED, Sergej (mentor)/ ŠERNEK Milan (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c.VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2016
IN	VPLIV SREDICE NA LASTNOSTI LAHKEGA LESNEGA PLOŠČNEGA KOMPOZITA
TD	Diplomski projekt (Univerzitetni študij - 1. stopnja)
OP	VII, 44 str., 3 pregl., 37 sl., 15 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Na tržišču je veliko število različnih lahkih lesnih ploščnih kompozitov, ki se med sabo razlikujejo po lastnostih. Mi smo za primerjavo vzeli kompozite s sredico iz papirnatega satovja in pene iz ekspandiranega polistirena, ki sta zelo široko uporabljeni vrsti sredice. Plošče smo testirali na upogib, tlak in čvrstost površine. Po pridobljenih podatkih in analizi le-teh smo začeli z dimenzioniranjem lastne sredice. Za to sredico smo uporabili MDF letvice in poliuretansko peno. Izdelano ploščo smo preskusili na upogib in tlak. Ugotovili smo, da je sprememba upogibne trdnosti minimalna, medtem ko je sprememba tlačne trdnosti v primerjavi z kontrolnimi ploščami velika.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND Du1

DC UDC 630*86

CX lightweight wood-based composites/paper honeycomb/foam/core/medium density fiberboard

AU SKOK, Rok

AA MEDVED, Sergej (supervisor)/ ŠERNEK Milan (reviewer)

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

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

PY 2016

TY INFLUENCE OF THE CORE ON THE LIGHTWEIGHT WOOD-BASED COMPOSITE

DT B. Sc. Thesis (Academic Study Programmes)

NO VII, 44 p., 3 tab., 37 fig., 15 ref.

LA sl

Al sl/en

AB On the market we can find a variety of different lightweight wood-based composites that differ in main properties. We used paper honeycomb and foam based core for comparison because they are most widely used as core material. We tested these panels for bending and pressure strength. After analysis we proceeded with designing our own type of core. For our type of core MDF strips and polyurethane foam were used. Panel was tested on bending and compression. We determined that newly made core improved compression strength while the bending strength stayed the same as it was at honeycomb and foam core panel.

KAZALO

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	II
KEY WORDS DOCUMENTATION	III
KAZALO VSEBINE.....	IV
KAZALO PREGLEDNIC.....	VI
KAZALO SLIK.....	VII
1 UVOD	1
1.1 PREDSTAVITEV PROBLEMA.....	1
1.2 DELOVNE HIPOTEZE	1
1.3 CILJI NALOGE	2
2 PREGLED OBJAV	3
2.1 LESNI PLOŠČNI KOMPOZITI	3
2.2 LAHKI LESNI PLOŠČNI KOMPOZITI.....	3
2.3 POLISTIREN	7
2.4 POLIURETAN	8
2.5 SREDICA	10
3 MATERIALI IN METODE	11
3.1 MATERIALI	11
3.1.1 Zunanji sloj	11
3.1.2 Sredica	11
3.2 METODE	12
3.2.1 Lepljenje plošč	12
3.2.2 Razrez plošč	13
3.3 METODE PREIZKUŠANJA	14
3.3.1 Določanje gostote in površinske mase.....	14
3.3.2 Preizkus upogibne trdnosti.....	16
3.3.3 Preizkus tlačne trdnosti.....	17
3.3.4 Čvrstost površine	18
4 REZULTATI.....	20
4.1 GOSTOTA IN POVRŠINSKA MASA.....	20
4.2 UPOGIBNA TRDNOST	21

4.3 TLAČNA TRDNOST	26
4.4 ČVRSTOST POVRŠINE	34
5 RAZPRAVA IN SKLEPI.....	39
5.1 RAZPRAVA.....	39
5.2 SKLEPI.....	40
6 VIRI	41
ZAHVALA	

KAZALO SLIK

Slika 1: Razponi gostote lesnih ploščnih materialov (privzeto po Thoemen, 2008).....	4
Slika 2: Komponente sendvič plošče (Petras, 1998)	5
Slika 3: Trdnost plošče v odvisnosti od debeline sredice (Petras, 1998)	6
Slika 4: Prikaz satovja s šesterokotnimi prostori (Petras, 1998)	6
Slika 5: Polistiren (Petrič, 2008)	7
Slika 6: Ekstrudiran polistiren (EPS) (2016).....	8
Slika 7: Uretan (Petrič, 2008).....	9
Slika 8: Prikaz oblikovanja satovja (Barboutis in Vassiliou, 2013).....	12
Slika 9: Prikaz mreže iz MDF deščic	13
Slika 10: Preizkušane velikosti 100 mm x 100 mm, pripravljen na meritev dimenzij.....	15
Slika 11: Preizkus upogibne trdnosti plošče s sredico iz EPS.....	17
Slika 12: Preizkus tlačne trdnosti preizkušanca s papirnatim satovjem	18
Slika 13: Modelarska krožna žaga (Sok, 2013).....	19
Slika 14: Preizkušanci za preizkus čvrstosti površin.....	19
Slika 15: Gostota plošč	20
Slika 16: Površinska masa plošč.....	21
Slika 17: Upogibna trdnost plošč	22
Slika 18: Prikaz upogibne obremenitve plošče s sredico iz papirnatega satovja.....	23
Slika 19: Prikaz upogibne obremenitve plošče s sredico iz EPS-a.....	24
Slika 20: Prikaz upogibne obremenitve plošče z MDF mrežo	24
Slika 21: Prikaz upogibne obremenitve plošče z MDF mrežo in PUR peno	25
Slika 22: Modul elastičnosti plošč.....	25
Slika 23: Primerjava tlačnih trdnosti	28
Slika 24: Primerjava maksimalnih sil pri tlačni obremenitvi	28
Slika 25: Prikaz deformacije pri tlačni obremenitvi.....	29
Slika 26: Tlačno obremenjevanje plošče s sredico iz papirnatega satovja.....	29
Slika 27: Tlačno obremenjevanje plošče s sredico iz EPS-a	30
Slika 28: Tlačno obremenjevanje plošče z MDF mrežo.....	31
Slika 29: Tlačno obremenjevanje po ploskvi plošče z MDF mrežo in PUR peno	31
Slika 30: Preizkus tlačne trdnosti preizkušanca zasnovanega v laboratoriju	32
Slika 31: Prikaz loma plošče s sredico iz papirnatega satovja zaradi obremenjevanja po robu	33
Slika 32: Prikaz loma plošče s sredico iz EPS zaradi obremenjevanja po robu.....	33
Slika 33: Maksimalna sila pri določanju čvrstosti površine	35
Slika 34: Čvrstost površine.....	35
Slika 35: Preizkušanci za testiranje čvrstosti površine.....	36
Slika 36: Izvajanje preizkusa čvrstosti površine.....	37
Slika 37: Stična površina med zunanjim slojem in papirnatim satovjem.....	38

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Prikaz maksimalne sile, upogiba, modula elastičnosti in upogibne trdnosti ...	22
Preglednica 2: Prikaz rezultatov tlačne obremenitve vzorcev	27
Preglednica 3: Čvrstost površine	34

1 UVOD

Lahki lesni ploščni kompoziti so kompoziti, sestavljeni iz zunanjih slojev, ki dajejo kompozitu trdnost in trdoto ter lahke sredice, ki omogoča prenašanje obremenitev in zmanjšuje težo kompozitu. Lahki ploščni kompoziti se najpogosteje uporabljajo za izdelavo pohištva in vratnih kril. Lahki lesni ploščni kompoziti nam omogočajo, da dobimo masiven izgled pohištva in hkrati ne zvišamo mase le-tega. Z zmanjševanjem mase olajšamo transport, vendar pa moramo upoštevati, da je volumen teh plošč precej večji, kar lahko kljub temu predstavlja določene izzive pri transportu. Pomembna lastnost lahkih plošč je razmerje med težo in trdnostjo materiala, ki je pri lahkih ploščnih kompozitih optimalna (nizka teža, relativno dobre lastnosti). K trdnosti lahkega lesnega ploščnega kompozita največ prispeva zunanji sloj, za katerega uporabljamo MDF plošče, iverne plošče, vezane plošče itd. Za sredico se največkrat uporablja papirnato satovje, ekspanzirani polistiren, poliuretanska pena in satovja iz umetnih materialov. V pohištveni industriji se najpogosteje uporablja papirnato satovje, ki nudi zadostno trdnost in je hkrati relativno poceni. Lahki lesni ploščni kompoziti s sredico iz papirnatega satovja imajo slabše mehanske lastnosti (še posebej tlačna trdnost) in se zato poskuša zamenjati z drugimi materiali, kot je ekspanzirani polistiren ali poliuretanska pena, plastično satovje, aluminijasto satovje.

1.1 PREDSTAVITEV PROBLEMA

Mehanske lastnosti lahkih lesnih ploščnih kompozitov dosegajo vrednosti, ki so dovolj visoke za pohištveno uporabo, pri večjih obremenitvah pa se pojavijo določene pomanjkljivosti. Največji vzrok razlik v kakovosti lahkih ploščnih kompozitov je povezan z materialom, uporabljenim za izdelavo sredice. Sredica mora namreč prenesti obremenitev na spodnji zunanji sloj, pri čemer pa ne sme priti do njene porušitve.

1.2 DELOVNE HIPOTEZE

Predvidevamo, da bomo pri uporabi pen in ekspandiranega polistirena pridobili boljše lastnosti plošče, kot pri uporabi sredic v obliki satovja ali mreže. Material, ki ga bomo zasnovali se bo med poizkusi obnašal bolje in tako predstavljal boljši lahki lesni ploščni kompozit.

1.3 CILJI NALOGE

Cilj naloge je ugotoviti vpliv izbire materiala za sredico na lastnosti lahkega ploščnega kompozita.

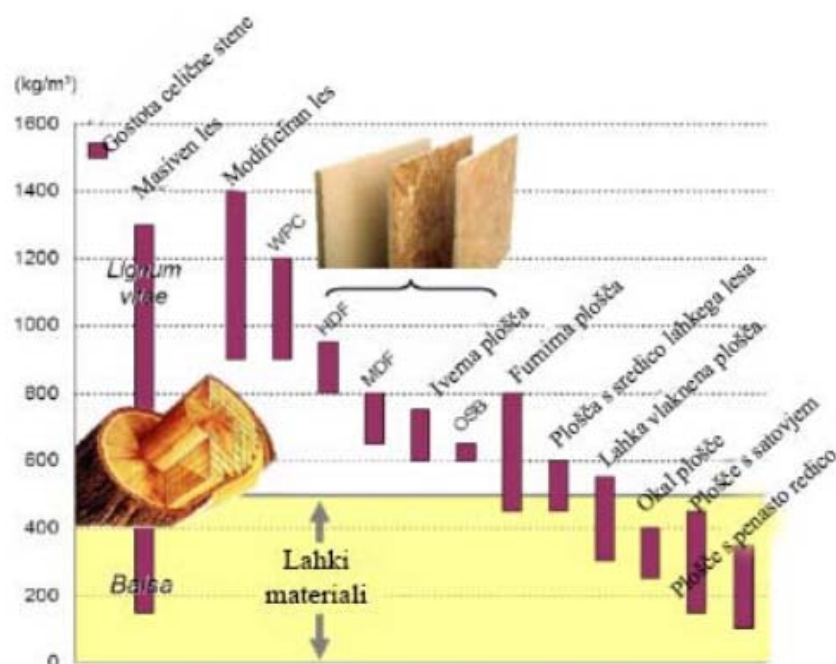
2 PREGLED OBJAV

2.1 LESNI PLOŠČNI KOMPOZITI

Izraz lesni ploščni kompoziti predstavlja široko paleto različnih ploščnih produktov, ki jih lahko najdemo na trgu, kot so iverne, vlaknene, furnirne in OSB plošče. Čeprav te kompozite uporabljamo že več desetletij in imajo relativno dobre lastnosti, pa še vedno iščemo nove različice z boljšimi lastnostmi. Rešitve oz. izboljšave iščemo tako v morfologiji gradnikov, kakor tudi v samem lepilu, ki je vezni člen med gradniki. Pomemben dejavnik uporabnosti lesnega ploščnega kompozita je emisija človeku škodljivih substanc kot npr. formaldehida, količino katerega se v zadnjih desetletjih iz lesnih ploščnih kompozitov izloča drastično manj kot v preteklosti. Poleg formaldehida pa je pomembna tudi omejitev izločanja hlapljivih organskih spojin, imenovanih VOC. Pomembno vodilo pri izdelavi kompozitov pa je tudi razpolaga snovi na trgu in potrebe trga po določenih materialih (Thoemen in sod., 2010).

2.2 LAHKI LESNI PLOŠČNI KOMPOZITI

Lahki lesni ploščni kompoziti so na trgu šele nekaj desetletij in so še vedno v razvoju. Pomemben podatek pri izdelavi in konstruiranju lahkih lesnih ploščnih kompozitov je ta, da mora biti gostota plošče nižja od 500 kg/m^3 . To lahko dosežemo z izbiro materialov, ki nam bodo zagotovili tako nizko gostoto ali z oblikovanjem materialov tako, da v plošči dobimo prazne prostore, ki posledično znižajo gostoto. Najbolj uporabljena sredica je papirnato satovje, ki z odprtinami zagotavlja dovolj nizko gostoto. Poleg satovja pa so širše uporabljene še furnirne plošče iz manj gostih vrst lesa, plošče s penastim polnilom in lahke vlaknene plošče. Lahke lesne ploščne kompozite je mogoče narediti iz vseh vrst lesnih ploščnih kompozitov tako, da za zunanji sloj uporabimo katerega od že poznanih kompozitov z višjo gostoto, za sredico pa uporabimo nek drug material z nižjo gostoto. V grafu na sliki 1 je razvidno, kateri materiali spadajo med lahke lesne ploščne materiale (Thoemen, 2008).



Slika 1: Razponi gostote lesnih ploščnih materialov (privzeto po Thoemen, 2008)

Kot že omenjeno, se za izdelavo lahkih lesnih ploščnih kompozitov najpogosteje uporablja papirnato satovje kot sredica. Ime satovje je dobilo zaradi šesterokotne oblike, ki spominja na satovje čebel. Poleg papirnatega satovja pa lahko uporabljamo tudi satovja iz aluminija in umetnih materialov. Poleg satovja je pomembna tudi penasta sredica, v kateri za razliko od satovja ni velikih praznih prostorov in je zato možno boljše doseganje večjih stičnih površin v lepilnem spoju.

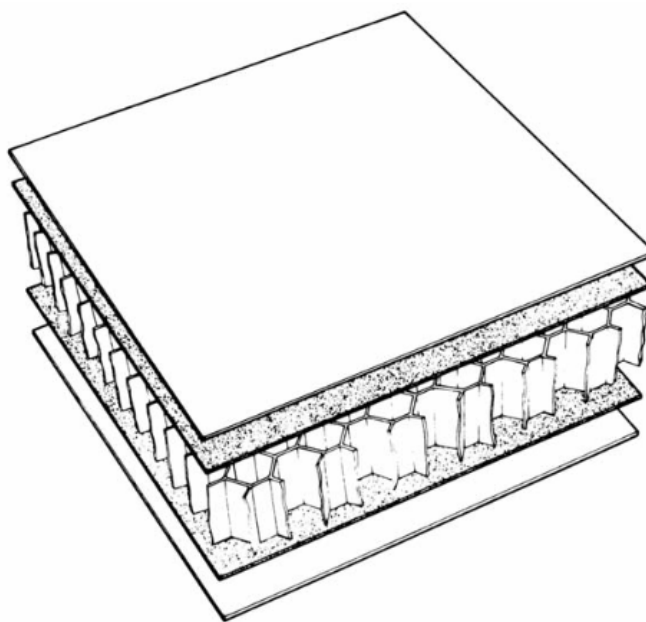
Izdelava lesnih ploščnih kompozitov se je začela zaradi potreb letalske in navtične industrije po lažjih materialih. S sendvič ploščami se lahko doseže masiven izgled, porabi pa se manj materiala. Izjemno pomembna lastnost lahkih lesnih ploščnih kompozitov je mehanska trdnost. Ti materiali morajo kljub znatnemu znižanju mase obdržati dovolj visoke mehanske lastnosti. Pri izdelavi teh kompozitov morajo proizvajalci zadostiti potrebam po kakovosti, prav tako pa mora biti izdelava dovolj poceni, da se izplača. Dobra lastnost lesnih ploščnih kompozitov je nizka cena in nizka teža materiala. Pri izdelavi plošč so proizvajalci praktično neomejeni z dimenzijami, saj je zunanji sloj narejen iz klasičnega lesnega ploščnega kompozita (iverna plošča, MDF itd.), sredica pa je iz satovja ali pene, katere brez težav krojimo na želene dimenzije (Bitzer, 1997).

Izdelava sendvič plošč se je začela tako, da so za zunanji sloj uporabili kvalitetnejše lesne vrste, za notranji sloj pa lesne vrste slabše kvalitete z nižjo gostoto. Prvi primer industrijske izdelave takšnega kompozita izhaja iz leta 1919, ko so za potrebe letalske industrije

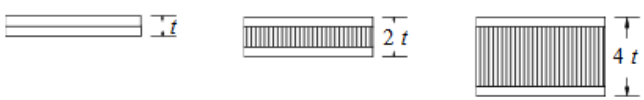
izdelali lahke plošče s sredico iz lesa balze in zunanji sloj iz lesa mahagonija. Na ta način so dosegli nižjo težo plošč in hkrati ohranili dovolj visoke mehanske lastnosti, da so ustrezale potrebam (Bitzer, 1997).

Leta 1930 se je začela industrijska izdelava sendvič plošč s papirnatim satovjem. Te plošče so pričeli izdelovati za industrijo pohištva v ZDA (Bitzer, 1997).

Sendvič plošče so narejene iz treh glavnih delov. Prvi del sta dve tanki in trdni plošči, ki služita za zunanji sloj, drugi del je debela in lahka sredica, katere namen je prenašati obremenitve z enega zunanjega sloja na drugega, in zadnji tretji del je lepilo, ki prenaša strižne in aksialne obremenitve (slika 2). Zaradi vstavljanja sredice in razmaka zunanjih slojev, se ustvari moment, ki je zmožen prenašati višje upogibne sile. Tako dobimo material, kateremu se le malo poveča teža, poveča pa se mu znatno mehanska trdnost. Iz slike 3 je razviden vpliv povečevanja mehanskih lastnosti sendvič plošče z večanjem debeline srednjega sloja (Petras, 1998).



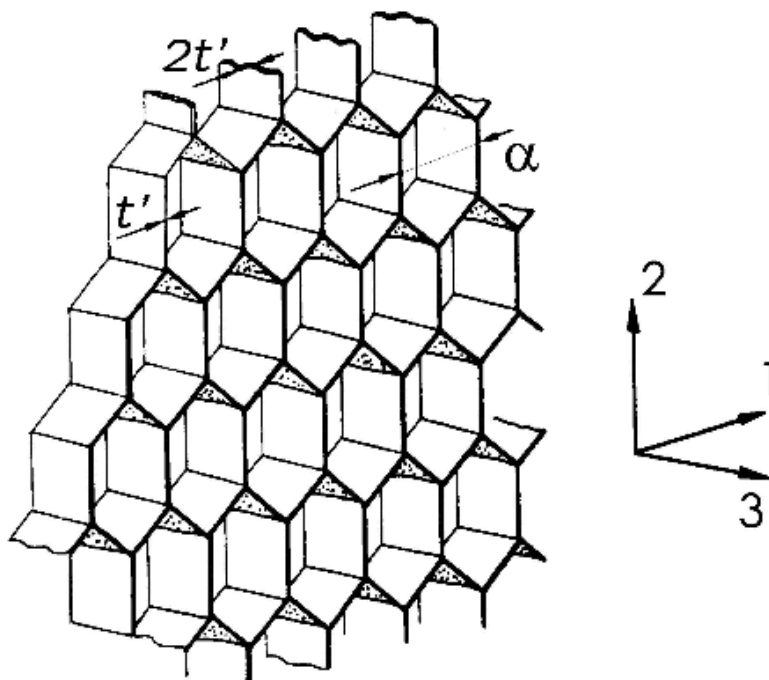
Slika 2: Komponente sendvič plošče (Petras, 1998)



Relative Bending Stiffness	1	7.0	37
Relative Bending Strength	1	3.5	9.2
Relative Weight	1	1.03	1.06

Slika 3: Trdnost plošče v odvisnosti od debeline sredice (Petras, 1998)

Satovje (slika 4) je najpogosteje uporabljen material za sredico v sendvič ploščah. Prednost satovja je dobro razmerje med mehanskimi lastnostmi in težo. Papirnato satovje je zlepljeno iz trakov papirja, ki zaradi posebnega načina spajanja nato tvorijo takšno obliko. Kljub izjemno dobremu razmerju med maso in trdnostjo pa se zaradi izjemno majhne specifične površine pojavijo problemi pri lepljenju. Za dovolj dobro zlepljenost zato potrebujemo lepila, ki se penijo in tako ustvarijo večjo površino zlepljenega spoja. Predstavlja pa papirnato satovje najcenejši material za uporabo v srednjem sloju, zato je njegova uporaba tako razširjena (Petras, 1998).



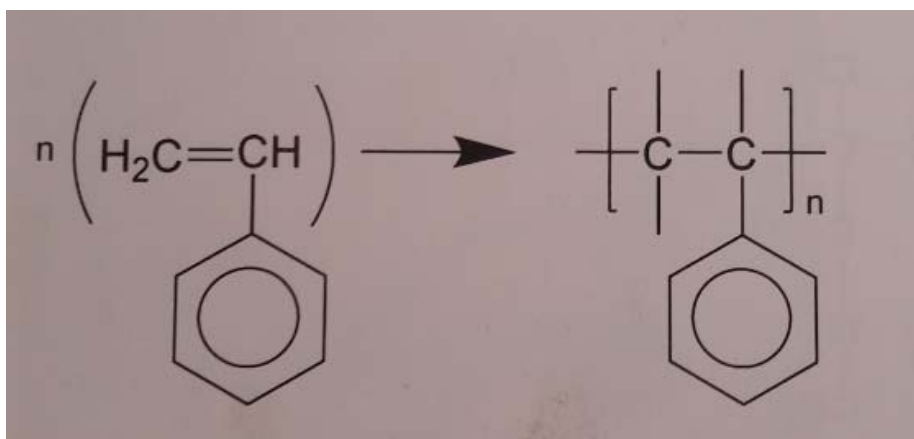
Slika 4: Prikaz satovja s šesterokotnimi prostori (Petras, 1998)

Material, ki se po svojih lastnostih lahko primerja s satovjem, je pena. Pena ima lahko zaradi večje površine stika z zunanjimi sloji boljše lastnosti od satovja. Ima pa praviloma satovje boljše mehanske lastnosti od pen (Bitzer, 1997).

V preteklosti so že izvajali poskuse, v katerih so poizkušali kombinirati satovje s poliuretansko peno in so prišli do ugotovitev, da se lastnosti plošč ne izboljšajo. Namen pene v satovju je preprečitev upogibne porušitve sten satovja in tako izboljšati trdnost plošče. Ker rezultati niso bili zadovoljivi, se pri uporabi industrijskih satovij ne priporoča uporaba pene kot polnila (Bitzer, 1997).

2.3 POLISTIREN

Polistiren je umeten material, ki se v osnovni obliki pojavlja v brezbarvni, krhki in trdi obliki. Polistiren je sestavljen (slika 5) iz benzenovih obročev, povezanih z glavno verigo. Polistiren je amorfni material. Najbolj poznan material je ekspanziran polistiren, ki ga drugače imenujemo tudi stiropor, poznamo pa še tudi druge načine izdelave kot je ekstrudiranje, pri čemer nastane EPS. Polistiren je eden najširše uporabljenih umetnih materialov. Ekspanzijo se doseže s segrevanjem materiala, tako se v polistirenu ujamejo mehurčki zraka, ki zagotavljajo nizko gostoto in nizko toplotno prevodnost (Petrič, 2008).



Slika 5: Polistiren (Petrič, 2008)

Ekspanziran polistiren je pogosto uporabljen za izolacijo zaradi njegovih dobrih izolacijskih lastnosti. Toplotna prevodnost ekspanziranega polistirena znaša med 0,035–0,04 W/mK. Material je odporen na temperature do 80°C in je ljudem neškodljiv. Odporen

je na vsa anorganska topila, ni pa primeren za izpostavitve UV-sevanju in organskim topilom, saj slednja topijo polistiren. Ta material ni primeren za višje mehanske obremenitve in izpostavitvi vode. Za težje pogoje je bolj primeren ekstrudiran polistiren, ki ima zaradi drugačnega postopka izdelave zaprte celice in ne vpija vode v tolikšni meri (AURE, 2003).

Ekstrudirani polistiren (EPS, slika 6) se pogosto uporablja za izolacijo podzemnih delov stavb. Zaradi drugačnega postopka izdelave od ekspandiranega polistirena je potrebne več energije za izdelavo materiala. Zaradi drugačnega postopka izdelave pa so posledično tudi lastnosti drugačne. Ekstrudirani polistiren se zaradi zaprtih celic ponaša s precej nižjo vpojnostjo vode. Material ima boljše mehanske lastnosti, tršo površino in boljšo toplotno izolativnost. Gostota EPS-a znaša med 28–45 kg/m³. Ta material se uporablja za modelarstvo in gradnjo modelov, pogosto pa zamenjuje tudi karton. Toplotna prevodnost niha med 0,029–0,039 W/mK, odvisno od natančnejšega postopka izdelave (Wikipedia, 24.7.2016).



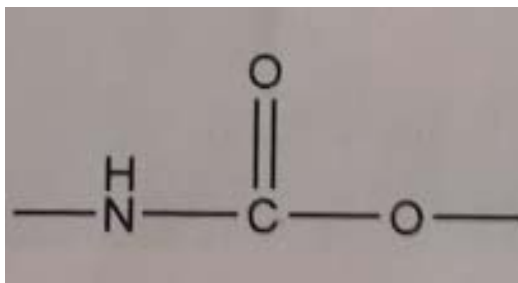
Slika 6: Ekstrudirani polistiren (EPS) (2016)

2.4 POLIURETAN

Poliuretani so zelo pomembni na področju lesarstva, ker se uporabljajo kot lepila, premazi in pene. Poliuretan je sestavljen iz uretana, ki se veže v verige. Uretan (slika 7) se povezuje v daljše verige in tako nastaja poliuretan. Za izdelavo poliuretana se najpogosteje uporablja polietre in poliestre (Petrič, 2008).

Petrič (2008) omenja, da je po neki definiciji poliuretan vsak polimerni material, pri katerem so v verigah organske enote med sabo povezane z uretanskimi vezmi. Te vezi v

splošnem nastanejo z reakcijo med di- ali poliizocianati in dvo- ali večfunkcionalnimi alkoholi.



Slika 7: Uretan (Petrič, 2008)

Poliuretani so možno uporabljati za več namenov. Z industrijsko izdelavo pen so začeli že leta 1954. Najbolj uporabljene so mehke pene, saj se uporabljajo za oblaganje pohištva, sedežev v avtomobilih itd. Možna pa je tudi izdelava trših poliuretanskih pen, ki se uporabljajo kot izolacijski material. Takšno peno se uporablja v gradbeništvu, letalski industriji in navtični industriji. Primerna je kot material v lahkih lesnih ploščnih kompozitih, saj ima nizko gostoto in slabo toplotno prevodnost. Poliuretanu je potrebno dodati razna sredstva za penjenje in katalizatorje, da dobimo željene lastnosti pene. Poleg pen se poliuretani uporabljajo tudi kot premazna sredstva za les (Petrič, 2008).

Poliuretanska lepila se delijo na enokomponentna in dvokomponentna lepila. Pri dvokomponentnih lepilih potrebujemo dve ločeni substanci, ki ob stiku hitro zamrežita in ustvarita močno vez. Ena komponenta je navadno poliestri, ki je raztopljen v organskem topilu. Ta prva komponenta mora vsebovati hidroksilne skupine. Druga komponenta, ki je diizocianat, mora biti tako kot prva raztopljena v organskem topilu, najpogosteje je to etilacetat. Enokomponentna poliuretanska lepila ne potrebujejo dodatne komponente za zamreženje. Potrebujejo le vodo, zato je potrebno pri shranjevanju zagotoviti, da lepilo ne pride v stik z vodo. To lepilo lahko utrjuje samo s pomočjo zračne vlage (Resnik, 1997).

Poliuretanska lepila imajo zelo dobro lastnost in to je odpornost na vodo. Prav zaradi te lastnosti so zelo primerna za uporabo v težjih pogojih izpostavitve. Imajo zelo dobro oprijemnost na različnih površinah in tako omogočajo zlepljanje različnih materialov. Izocianati so strupeni snovi in to je razlog, da so tudi poliuretanska lepila strupena. Pri lepljenju vlažnejšega lesa voda vpliva na izocianatno skupino v lepilu in tako sproži penjenje lepila. To lahko oslabi spoj. V primeru lepljenja satovja z lesnimi ploščami pa lahko to penjenje predstavlja prednost, ker omogoči večjo stično površino med lepilom in satovjem (Resnik, 1997).

2.5 SREDICA

Kot sredico lahko v lahkih ploščah uporabimo veliko različnih materialov. Najbolj pogost material je papirnato satovje. Papirnato satovje omogoča zelo nizko gostoto kompozita, ima pa zato slabše mehanske lastnosti. Namesto papirnatega satovja se lahko uporablja satovje iz polimernih materialov ali aluminija, ki ima boljše mehanske lastnosti. Se pa zaradi uporabe druge vrste surovine poviša gostota. Namesto satovja lahko uporabimo tudi penasto polnilo, ki ima boljšo tlačno trdnost kot papirnato satovje. Penasta polnila spadajo med polne sredice, kar lahko predstavlja prednost pri zlepljanju, ker v materialu, uporabljenem za sredico, ni praznih prostorov in je zato čvrstost površine boljša. To izboljša tudi stabilnost plošče. Kot sredica se uporabljajo tudi lesne vrste z zelo nizko gostoto (balsa) ali lesene deščice in furnirji, oblikovani tako, da ustvarijo v sredici prazne prostore in znižajo gostoto. Pri vseh lahkih lesnih ploščnih kompozitih lahko z zmanjšano maso opazimo tudi znižanje mehanskih lastnosti, se pa pri vsaki vrsti sredice pojavljajo različne prednosti in slabosti materiala. Trend pa je takšen, da poizkušajo s kombinacijami materialov za zunanji in notranji sloj ustvariti material z najboljšim razmerjem med maso in mehanskimi lastnostmi (Medved, 2008).

3 MATERIALI IN METODE

Pri projektu je bil cilj dimenzionirati lahek lesni ploščni kompozit, s katerim bomo dosegli boljše lastnosti kot pri kompozitu, kjer se kot sredica uporablja papirnato satovje. Pri izdelavi kompozita smo se osredotočali na vpliv sredice na kakovost celotne plošče. Za zunanji sloj smo izbrali tanko MDF ploščo, saj najmanj vpliva na lastnosti lahkega ploščnega kompozita. Za sredico smo uporabili papirnato satovje, ekspanziran polistiren, poliuretansko peno, ter trakove MDF plošče (za mrežo).

3.1 MATERIALI

3.1.1 Zunanji sloj

Za zunanji sloj je bila uporabljena industrijska MDF plošča. Plošča je bila debeline 3 mm, ker smo tako najbolj zmanjšali njen vpliv na mehanske lastnosti plošče in tako omogočili sredici večji vpliv. Gostota MDF plošč je bila 840 kg/m^3 in je sama precej presegala parametre za lahki lesni ploščni kompozit.

3.1.2 Sredica

Za sredico smo izbrali naslednje materiale:

- papirnato satovje: debelina satovja 30 mm, debelina stene satovja je bila 0,28 mm, površina celice satovja pa je znašala 375 m^2
- ekstrudiran polistiren (EPS): uporabljen je bil EPS debeline 30 mm
- trakove MDF plošče: debelina traka je bila 3,3 mm, širina pa 30 mm (kar je kasneje predstavljalo tudi debelino sredice, sestavljene iz trakov v obliki mreže)
- dvokomponentna poliuretanska pena (TKK d.o.o., Srpenica)

Razlog, da smo izbrali papirnato satovje, je povezan z njegovo uporabo, saj je veliko lahkih ploščnih kompozitov izdelanih ravno z uporabo papirnatega satovja. Poleg papirnatega satovja je zelo široko uporabljen tudi ekstrudiran polistiren, ki smo ga iz tega razloga prav tako uporabili za izdelavo lahkih lesnih kompozitov. Poleg teh dveh klasičnih in široko uporabljenih materialov smo za sredico uporabili še MDF trakove, ki smo jih sestavili v mrežo (razdalja 75 mm) in poliuretansko peno (PUR). Kombinacija mreže iz MDF trakov in PUR pene je sredica za novo izdelani lahki ploščni kompozit.

Sredice smo na zunanje plošče zlepili s poliuretanski lepilom Mitopur E45.

3.2 METODE

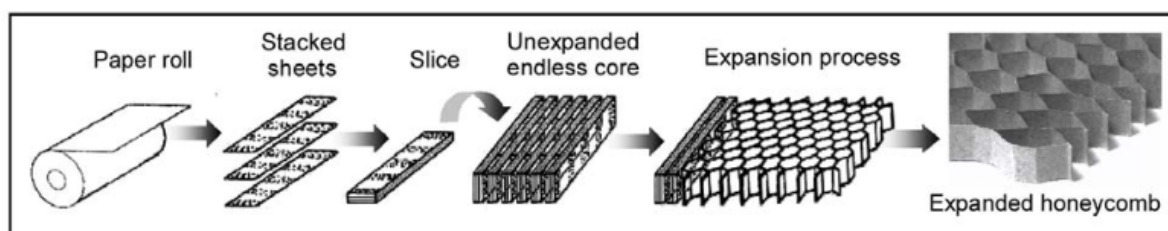
3.2.1 Lepljenje plošč

Na površino MDF plošče dimenzij $600 \times 600 \text{ mm}^2$ smo nanесли 200 g poliuretanskega lepila. Na ploščo smo nato postavili sredico (EPS, pena, satovje, MDF mreža), na katero smo postavili še drugo MDF ploščo z nanešenim lepilom. Tako pripravljen kompozit smo kasneje obremenili s primernim tlakom in ga pustili, da je lepilo utrdilo pri sobni temperaturi.

Pri uporabi papirnatega satovja smo le-tega morali predhodno raztegniti (slika 8) do primerne stopnje, pri kateri je struktura satovja najbolj učinkovita.

Omenjeni plošči smo uporabili kot referenčni plošči. Glede na dosežene lastnosti smo nato pripravili še tretjo ploščo, kjer je bila sredica kombinacija vertikalnih letvic (mreža) iz MDF trakov (slika 9), kot polnilo med letvami pa smo uporabili poliuretansko peno. Razdalja med trakovi je bila 75 mm.

Poleg plošče s poliuretansko peno smo zlepili še dodatno ploščo, ki je imela za srednji sloj le mrežo iz MDF deščic in brez poliuretanske pene. Na površino zunanjih MDF plošč smo nanесли 200 g lepila in mednje vstavili mrežo ter jo pod zahtevanim tlakom pustili stikati primerno dolgo, da je lepilo utrdilo.



Slika 8: Prikaz oblikovanja satovja (Barboutis in Vassiliou, 2013)



Slika 9: Prikaz mreže iz MDF deščic

Kljub načrtovani razdalji med trakovi (75 mm) smo pri sestavljanju mreže opazili zvijanje trakov in posledično spremembo razdalje med trakovi, ki je znašala med 73 in 77 mm, kar je predstavljalo problem pri uporabi EPS kot polnila (kot je prikazano na sliki 9), zato smo namesto EPS-a uporabili PUR peno.

3.2.2 Razrez plošč

Po utrditvi lepila je bilo potrebno plošče razžagati. Pred razžagovanjem je bilo potrebno določiti vrste testiranj, ki jih želimo opraviti na ploščah. Ko smo določili željene teste smo vedeli, kakšne dimenzije preizkušancev potrebujemo. Potrebovali smo preizkušance velikosti $100 \times 100 \text{ mm}^2$ za testiranje tlačne trdnosti, preizkušance dimenzij $500 \times 100 \text{ mm}^2$ za testiranje upogibne trdnosti in preizkušance dimenzij $50 \times 50 \text{ mm}^2$ za testiranje čvrstosti površine. Plošče smo razžagali s krožnim žagnim strojem. Za testiranje tlačne trdnosti smo potrebovali po 10 preizkušancev dimenzije $100 \times 100 \text{ mm}^2$ iz vsake plošče. Za testiranje upogibne trdnosti smo potrebovali 4 preizkušance, dimenzije $500 \times 100 \text{ mm}^2$, s sredico iz papirnatega satovja in 3 plošče s sredico iz EPS. Za preizkus čvrstosti površine

pa smo potrebovali po 8 preizkušancev iz vsake plošče, pri katerih smo preizkusili zlepljenost sredice s površinskim slojem.

Iz same MDF plošče smo izrezali 7 preizkušancev dimenzije $500 \times 100 \text{ mm}^2$ za preizkus upogibne trdnosti in 14 preizkušancev dimenzije $100 \times 100 \text{ mm}^2$ za preizkus tlačne trdnosti.

Za preizkušanje naših lastnih plošč smo potrebovali preizkušance dimenzij $500 \times 100 \text{ mm}^2$ za preizkus upogibne trdnosti. Izžagali smo dva preizkušanca z mrežo, zapolnjeno s poliuretansko peno, in enega brez poliuretanske pene. Za preizkus tlačne trdnosti kompozitov smo iz vsake plošče izžagali po 4 preizkušance, dimenzije $100 \times 100 \text{ mm}^2$.

3.3 METODE PREIZKUŠANJA

3.3.1 Določanje gostote in površinske mase

Gostoto lahkih lesnih ploščnih kompozitov smo določili z upoštevanjem standarda SIST EN 323:1993. Gostoto smo izračunali na preizkušancih, uporabljenih za preizkušanje tlačne trdnosti plošče. Preizkušanci (slika 10) so bili dimenzij $100 \times 100 \text{ mm}^2$. Natančneje smo jim izmerili širino in dolžino. Debelino smo izmerili v vseh štirih vogalih, 20 mm od roba vzorca. Meritve širine in dolžine smo izvajali s kljunastim merilom, za meritve debeline pa smo uporabili mikrometrski vijak. Iz teh štirih meritev smo nato določili povprečno debelino vzorca. Po meritvah dimenzij smo preizkušance stekali na tehtnici, ki je natančna na stotinko grama.

Pri določanju površinske mase smo uporabili iste podatke kot pri določanju gostote, le s to izjemo, da v izračunih nismo potrebovali debelin plošč. Površinska masa je bolj preprost način za podajanje podatkov o lastnostih plošče.



Slika 10: Preizkušane velikosti 100 mm x 100 mm, pripravljen na meritev dimenzij

Izračun gostote

Formula

$$\rho = \frac{m}{(l*b*d)} [kg/m^3] \quad \dots(1)$$

Pomen oznak:

ρgostota (kg/m^3)

mmasa (kg)

ldolžina (m)

bširina (m)

ddebelina (m)

Izračun površinske mase

$$M = \frac{m}{A} = \frac{m}{l \cdot b} \quad [kg/m^2] \quad \dots(2)$$

Pomen oznakM.....površinska masa (kg/m^2)

m.....masa (kg)

A.....površina (m^2)

l.....dolžina (m)

b.....širina (m)

3.3.2 Preizkus upogibne trdnosti

Za preizkus upogibne trdnosti smo uporabili stroj Zwick Z 100 za mehansko preizkušanje. Stroj nam zagotavlja dovolj visoke sile za izvajanje poizkusov in nudi natančno odčitavanje dogajanja med lomom. Preizkuse za upogibno trdnost smo izvajali po standardu SIST EN 310:1993 in sicer na ploščah s sredico iz papirnatega satovja, EPS, mreže iz MDF deščic in mreže iz MDF ploščic, zapolnjene s poliuretansko peno. Preizkus smo izvajali tudi na samih MDF ploščah. Najprej smo preizkusili upogib ene same MDF plošče in nato še upogib dveh, med sabo nezlepljenih plošč. Testiranje upogiba samih vlaknenih plošč nam je služil za primerjavo vpliva sredice na izboljšanje lastnosti plošče. Dimenzija naših preizkušancev je bila $500 \times 100 \text{ mm}^2$, njihove debeline pa so se razlikovale v odvisnosti od materiala za srednji sloj. Upogibno trdnost smo preizkušali s tritočkovnim upogibom, pri katerem smo nastavili oporiščno razdaljo na 450 mm. Pri izvajanju meritev upogibne trdnosti je znašala hitrost pomika 2 mm/min pri lahkih lesnih ploščnih kompozitih in 20 mm/min pri samih MDF ploščah. Pri samih ploščah je bila hitrost pomika znatno višja zaradi višje prožnosti materiala in velikega upogiba.



Slika 11: Preizkus upogibne trdnosti plošče s sredico iz EPS

3.3.3 Preizkus tlačne trdnosti

Pri preizkusu tlačne trdnosti smo uporabili stroj Zwick Z 100 za mehansko preizkušanje. Ta stroj nam je lahko zagotovil dovolj visoke sile za porušitev strukture vzorcev. Preizkus smo izvajali po standardu prCEN/TS 00112189:2011.2. Tlačno trdnost smo testirali na preizkušancih dimenzije $100 \times 100 \text{ mm}^2$, kot je to navedeno v standardu. Preizkus smo izvajali na ploščah s sredico iz papirnatega satovja in EPS. Pri teh dveh ploščah smo preizkušali tlačno trdnost tako po ploskvi kot po robu plošče. Pri samih MDF ploščah smo tlačno trdnost preverjali le po robu plošče, ker smo želeli ugotoviti vpliv sredice na trdnost tudi po robu. Same MDF plošče smo najprej testirali posamič nato pa še nezlepljeno v parih. Plošče, ki smo jih sami zasnovali pa smo testirali samo po ploskvi, saj je bil test po robu nesmiseln. Pri izvajanju meritev je hitrost obremenjevanja znašala 2 mm/min .



Slika 12: Preizkus tlačne trdnosti preizkušanca s papirnatim satovjem

3.3.4 Čvrstost površine

Za preizkus čvrstosti površine smo upoštevali parametre, podane v standardu SIST EN 311. Iz plošč s sredico iz papirnatega satovja in EPS-a smo izrezali 8 preizkušancev dimenzije $50 \times 50 \text{ mm}^2$. Čvrstost površine smo preverjali le na prvih dveh ploščah, da smo analizirali šibkosti in prednosti posameznega materiala za sredico. Ko smo preizkušance izžagali iz plošče, je bilo potrebno z modelarsko krožno žago (slika 13) v zunanji sloj zarezati uture (slika 14), ki so nam zagotovili poznano stično površino med zunanjim slojem in sredico. Uture je bilo potrebno pri štirih preizkušancih iz vsake plošče zarezati na zgornji strani, štiri pa na spodnji strani plošče. Ko so bili utori zažagani smo s talilnim lepilom na površino preizkušancev nalepili pečate in preizkušance pustili, da se je lepilo utrdilo. Ko so bili preizkušanci pripravljeni, smo jih vstavili v stroj za mehansko testiranje

Zwick Z 100. Preizkušance smo obremenili na natezno napetost in izmerili silo potrebno za porušitev. Hitrost obremenjevanja na stroju je bila 2 mm/min.



Slika 13: Modelarska krožna žaga (Sok, 2013)

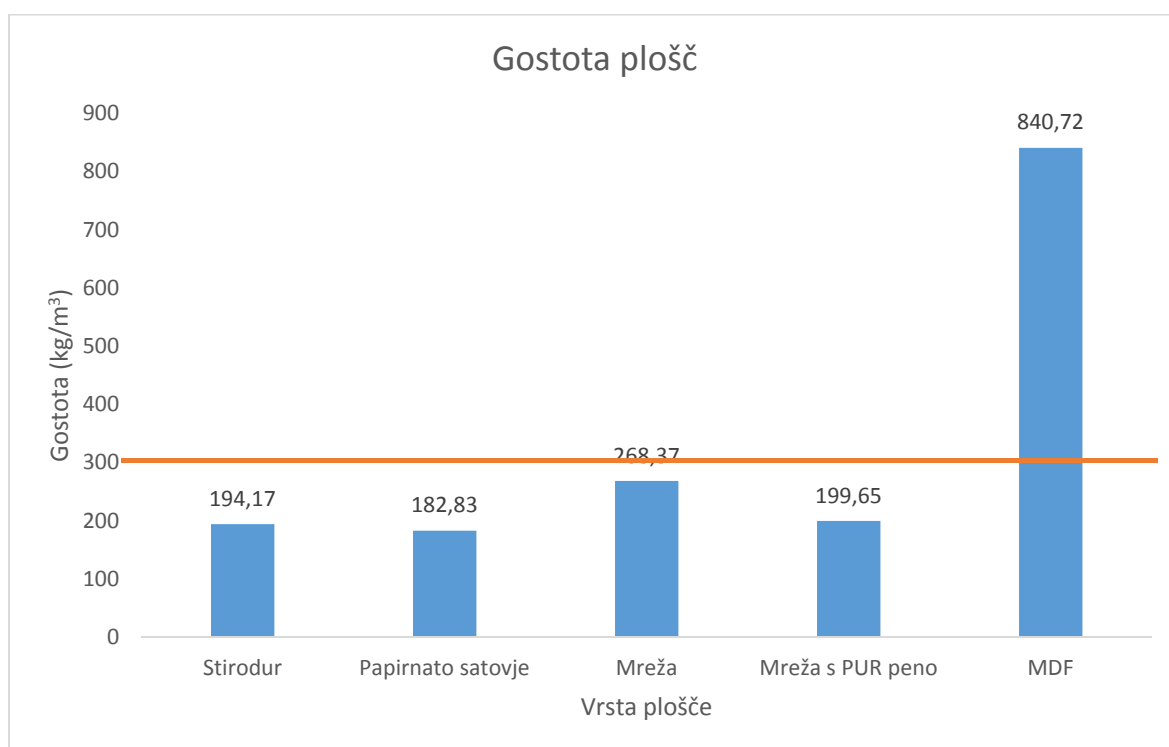


Slika 14: Preizkušanci za preizkus čvrstosti površin

4 REZULTATI

4.1 GOSTOTA IN POVRŠINSKA MASA

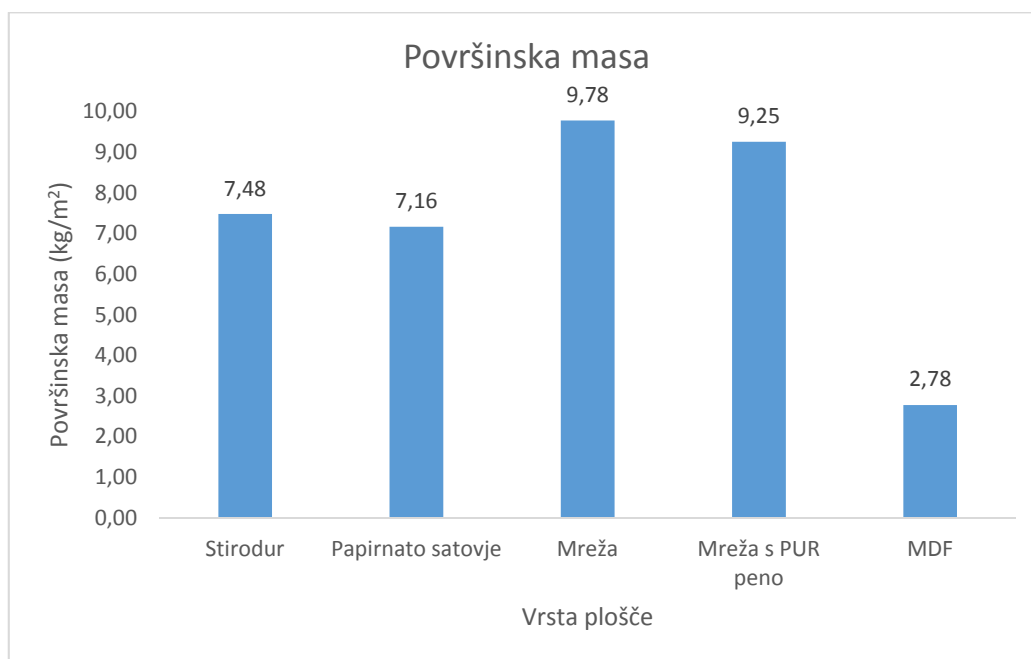
Gostote plošč in površinske mase so prikazane na sliki 15 in sliki 16.



Slika 15: Gostota plošč

Iz slike 15 je razvidno, da lahko vse kompozite uvrstimo med lahke lesne ploščne kompozite, ker je njihova gostota nižja od 300 kg/m^3 . Razvidno je, da je gostota plošč z mrežo iz MDF trakov višja od gostot EPS in papirnatega satovja. Gostota plošče z mrežo iz MDF trakov in dodano poliuretansko peno pa je bolj primerljiva s ploščama iz EPS in papirnatega satovja. Razlog za nižjo gostoto plošče s kombinacijo MDF trakov in poliuretanske pene najdemo v večji debelini te plošče. Zaradi raztezka poliuretanske pene na večjo debelino in posledične večje debeline celotne plošče je opazno precejšnje znižanje gostote. Do raztezka je prišlo zaradi prenizkega tlaka v fazi penjenja, zaradi česar sta se površinski plošči bolj razmaknili (debelina plošč je bila 10 mm višja kot pri ploščah iz mreže). Gostota te plošče bi bila v primeru, da bi bila količina pene primerna, rahlo višja od gostote plošče s trakovi. Za zunanje sloje smo uporabili MDF plošče, katerih gostota je precej visoka, vendar smo z uporabo različnih lahkih materialov za sredico gostoto

izdelanega lahkega ploščnega kompozita znižali na gostoto pod 300 kg/m^3 , pri čemer pa smo povečali težo kompozita. Takšno znižanje, ki je posledica povečanja debeline na račun dodajanja lahkega materiala, je zgolj navidezna sprememba gostote, zato je za lahke ploščne kompozite bolj smiselno podajanje vrednosti površinske mase (slika 16).



Slika 16: Površinska masa plošč

Površinska masa je pri ploščah, ki so enako debele, z gostoto linearno povezana. Pri ploščah, pri katerih se pojavljajo različne debeline, pa ta trend ne velja več. Površinska masa nam pove maso kvadratnega metra plošče. Ker je gostota lahkih plošč relativen podatek zaradi odprtih prostorov znotraj strukture, smo kot bolj primeren podatek uporabili podatek o površinski masi. Iz rezultatov je razvidno, da imata plošči z mrežo in s kombinacijo mreže in poliuretanske pene bistveno višjo površinsko maso.

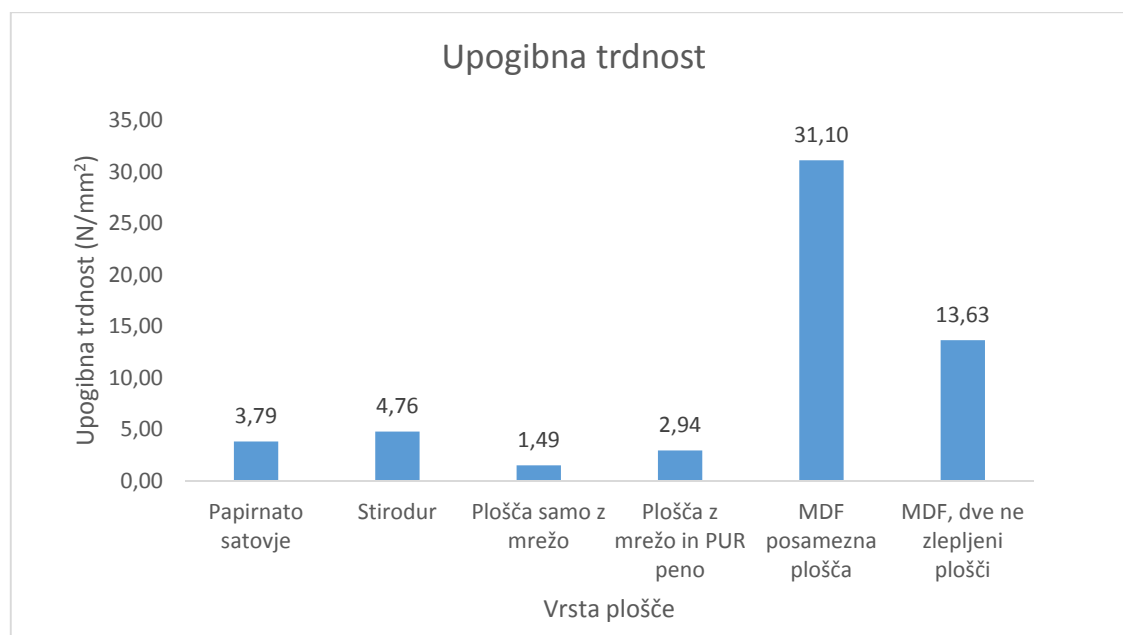
4.2 UPOGIBNA TRDNOST

Pri preizkusu upogibne trdnosti smo preizkušance dimenzij $500 \times 100 \text{ mm}^2$ obremenili na upogib (tritočkovni upogibni preizkus). Rezultati meritev upogibne trdnosti so prikazani v preglednici 1 (podane so tudi vrednosti sile loma, površine in modula elastičnosti) in na sliki 17.

Preglednica 1: Prikaz maksimalne sile, upogiba, modula elastičnosti in upogibne trdnosti

Vrsta plošče	$F_{loma}(N)$	Poves (mm)	$E_m(N/mm^2)$	$F_m(N/mm^2)$
Papirnato satovje	866,0	6,1	759,5	3,8
EPS	1106,7	11,0	517,3	4,8
Plošča samo z mrežo	301,0	18,4	262,0	1,5
Plošča z mrežo in PUR peno	977,0	14,1	275,5	2,9
MDF posamezna plošča	49,4	112,5	-	31,1
MDF, dve nezlepljeni plošči	88,1	99,1	1153,3	13,6

Najvišjo silo pri upogibni obremenitvi smo ugotovili pri uporabi EPS. Ta sila je 250 N višja od tiste pri papirnatem satovju. Opazimo lahko tudi, da je sila loma pri plošči z MDF mrežo in PUR peno višja od tiste, dosežene pri papirnatem satovju. Pri plošči brez poliuretanske pene pa je sila zelo nizka. Kljub primerljivim rezultatom sile med ploščo z MDF mrežo kombinirano s PUR peno in papirnatim satovjem se upogibna trdnost in modul elastičnosti razlikujeta (sta nižja). Pri preizkusu smo obremenitvi izpostavili tudi same MDF plošče in iz rezultatov je razvidno, da so sile loma precej nižje, poves plošč pa je bil značilno višji.



Slika 17: Upogibna trdnost plošč

Razvidno je, da se klasična materiala (papirnato satovje in EPS) pri obremenitvi na upogib obnašata veliko bolje in dosežata precej višje vrednosti kot plošče z mrežo iz letvic oz. kombinacija letvic in poliuretanske pene. Razlog za boljše rezultate pri klasičnih materialih

za sredico je bolj homogena zgradba. Pri plošči z mrežo iz letvic in pri kombinaciji s poliuretansko peno je velikost prostorov v mreži prevelika in tako ne moremo zagotoviti tako visoke upogibne trdnosti. Mreža ne zagotavlja zadostne stabilnosti v sredici plošče. Struktura mreže se brez pene hitro poruši, če pa dodamo poliuretansko peno, ki mrežo stabilizira, potem to povzroči previsoko togost sredice in prenašanje previsokih sil na spodnji zunanji sloj in posledično previsoko obremenitev le-tega, ki se poruši.

Slika 18 prikazuje obnašanje plošče s papirnatim satovjem. Satovje zelo dobro prenaša obremenitev in ne prenaša sile na spodnji zunanji sloj. Namesto prenašanja sile na spodnji zunanji sloj jo satovje absorbira, kar se pokaže v deformaciji satovja. Na mestih slabše zlepljenosti lahko pride do odstopanja sredice od zunanjih slojev zaradi pojava visokih strižnih sil. Papirnato satovje ima zelo dobre lastnosti glede na stično površino z zunanjim slojem.



Slika 18: Prikaz upogibne obremenitve plošče s sredico iz papirnatega satovja

Plošča s sredico iz stirodurja (slika 19) je po meritvah prikazala najboljše lastnosti izmed lahkih lesnih plošč. Upogibna trdnost plošče je znašala $4,76 \text{ N/mm}^2$. Pri teh ploščah je bilo razvidno, da je zlepljenost sredice z zunanjima slojema boljša in ni prihajalo do strižne porušitve. Razvidno je, da stirodur prenaša več sile na spodnji zunanji sloj (viden prelom spodnjega zunanjega sloja).



Slika 19: Prikaz upogibne obremenitve plošče s sredico iz EPS-a

Na sliki 20 je prikazan preizkušanelec samo z MDF mrežo. Upogibna trdnost tega preizkušanca je zelo nizka. Razlog za slabo kakovost najdemo v strukturi mreže, ki ni dovolj kompaktna (prevelik razmak med podpornimi elementi – mrežo) in se zaradi strižnih sil, ki se pojavijo, poruši in tako zmanjša upogibno trdnost plošče.



Slika 20: Prikaz upogibne obremenitve plošče z MDF mrežo

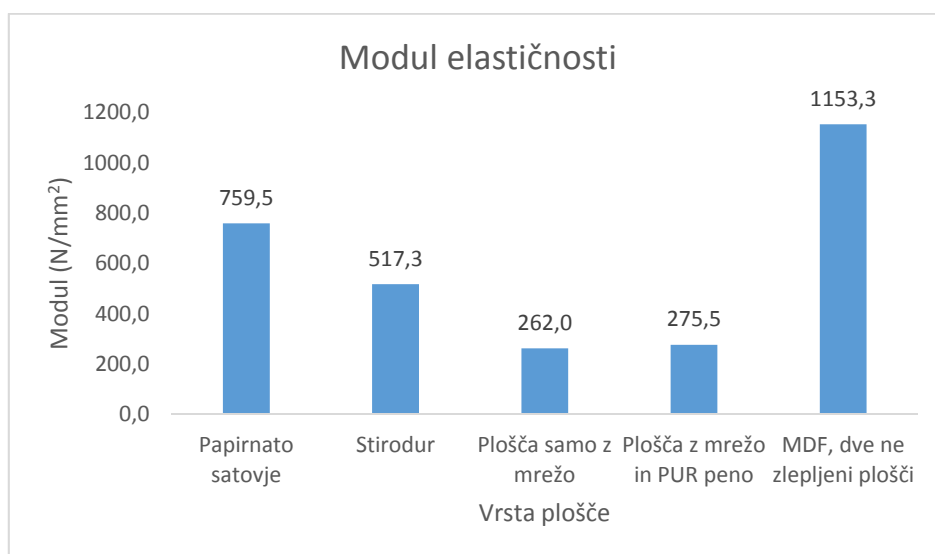
Preizkušanec z MDF mrežo in poliuretansko peno (slika 21) se je pri tem preizkusu obnašal mnogo bolje od preizkušanca brez pene. Takšna plošča veliko bolje prenaša strižne obremenitve, ki nastajajo med obremenjevanjem. Zaradi precej toge strukture se pri tej plošči zelo velika količina energije prenaša iz zgornjega zunanega sloja na spodnji in zato razmeroma hitro pride do loma in porušitve sistema.



Slika 21: Prikaz upogibne obremenitve plošče z MDF mrežo in PUR peno

Poleg upogibne trdnosti plošče smo merili tudi maksimalno silo, upogib in modul elastičnosti plošč (preglednica 1).

Vrsta sredice vpliva tudi na modul elastičnosti (slika 22).



Slika 22: Modul elastičnosti plošč

Izmed lahkih lesnih plošč ima sicer najvišji ugotovljen modul elastičnosti papirnato satovje, vendar moramo omeniti, da je višji ugotovljeni modul elastičnosti posledica manjšega prenašanja obremenitve z zgornjega zunanjega sloja na spodnji. Zgornji zunanji sloj se je zaradi obremenitve tudi tlačno porušil in se je uklonil precej bolj kot spodnji zunanji sloj. Pri EPS pa imamo višji upor proti tlačni sili, vendar se sila bolje prenaša na spodnji zunanji sloj in tako ne dosega tolikšnega upogiba ter modula elastičnosti. Pri papirnatemu satovju je zato prišlo do navidezno višjega modula elastičnosti, ker se je spodnji zunanji sloj manj uklonil kot pri ostalih vrstah sredice.

4.3 TLAČNA TRDNOST

Za preizkus tlačne trdnosti smo potrebovali preizkušance dimenzij $100 \times 100 \text{ mm}^2$. Tlačna trdnost je odvisna od materiala, uporabljenega za izdelavo sredice (preglednica 2).

Preglednica 2: Prikaz rezultatov tlačne obremenitve vzorcev

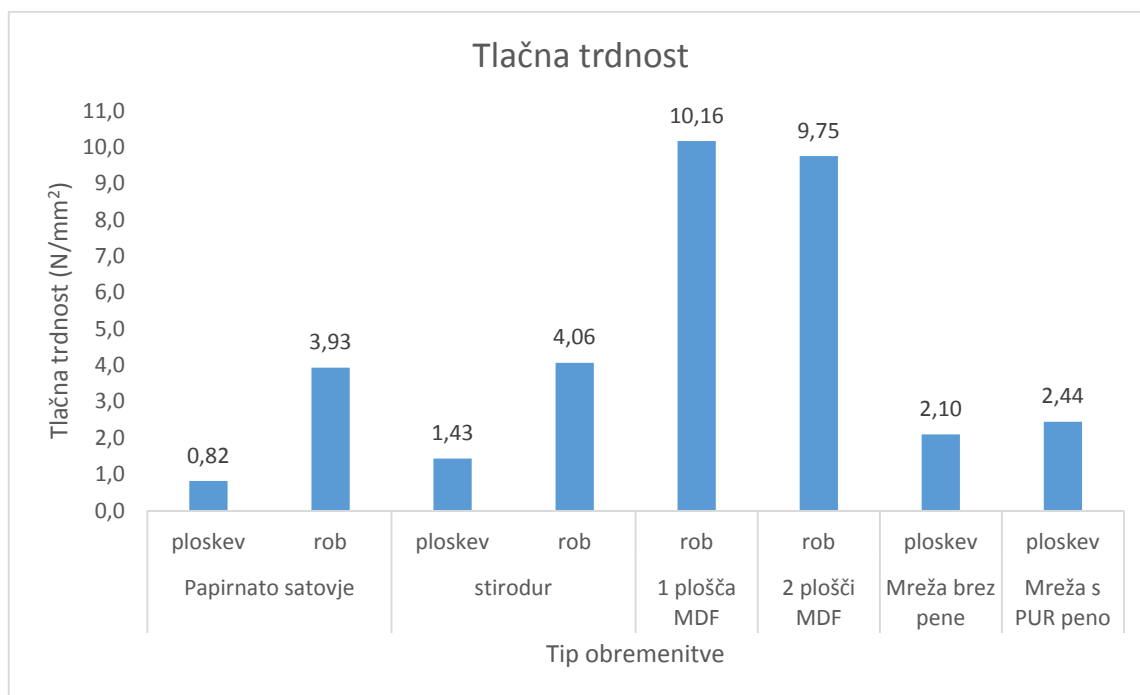
Vrsta sredice	Tip obremenitve	$F_{\max}$ (N)	dL (mm)	Tlačna trdnost (N/mm ²)
Papirnato satovje	ploskev	8080	26,08	0,82
	rob	15125	1,58	3,93
EPS	ploskev	14200	25,98	1,43
	rob	15625	1,53	4,06
1 plošča MDF	rob	3340	0,63	10,16
2 plošči MDF	rob	6453	0,73	9,75
Mreža brez pene	ploskev	21000	3,03	2,1
Mreža s PUR peno	ploskev	24375	30,4	2,44

Pri preizkusu tlačne trdnosti smo obremenili preizkušance ploskovno in po robu. Po robu smo obremenili samo MDF plošče, lahke plošče s sredico iz satovja in EPS. Tlačna trdnost MDF plošče (po robu) je relativno visoka, vendar moramo pri tem opozoriti na relativno visok uklon, ki pa je posledica uporabe tankega materiala.

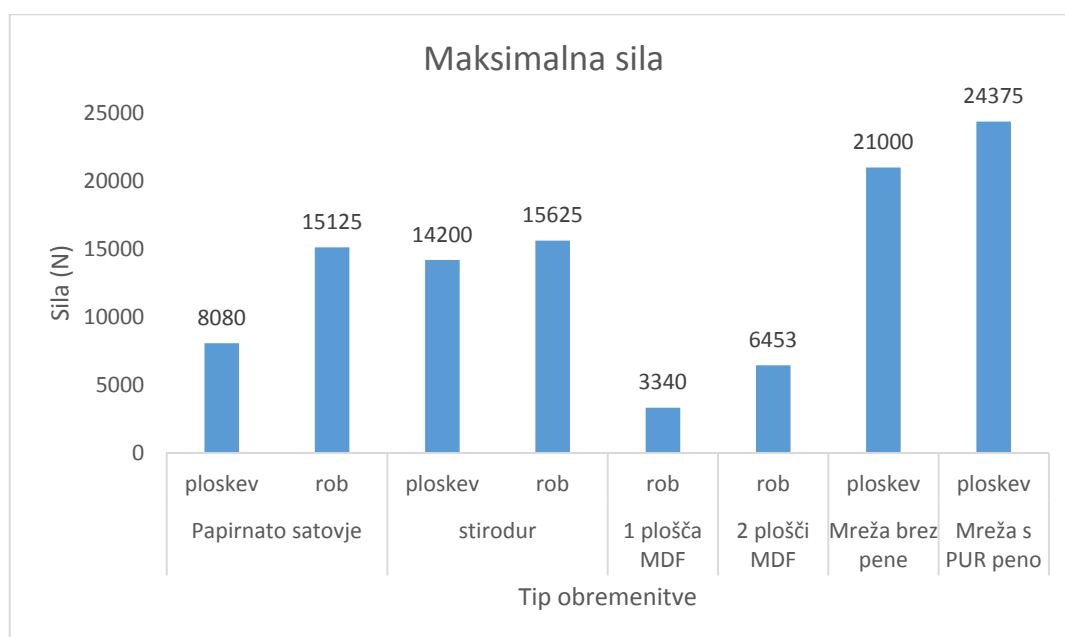
Pričakovano nižjo tlačno trdnost smo ugotovili pri lahkih ploščah, vendar pa so se tu zaradi oblike materiala (dve MDF plošči s sredico iz lahkega materiala) pojavile precej višje sile, potrebne za porušitev strukture (primerjava rezultatov tlačne trdnosti, določene po robu). Tako je razvidno, da večino tlačne trdnosti lahkih plošč po robu zagotavljata zunanja sloja, medtem ko sredica stabilizira površinska sloja in posledično preprečuje njuno zvijanje in uklon.

Pri tlačnem preizkusu po ploskvi pa se pokaže izključno vpliv sredice. Iz podatkov je razvidno, da papirnato satovje zelo slabo prenaša tlačno trdnost. Vzrok za to najdemo v njegovi obliki. Sestavljeno je iz tankega papirja, ki zagotavlja neko stopnjo tlačne trdnosti zaradi strukture celic. Pri tlačni obremenitvi papirnato satovje nekaj časa prenaša obremenitev, nato pa se poruši in ne nudi več odpora. Drugačen trend je opazen pri EPS. Pri tem materialu je tlačna trdnost nekoliko višja kot pri papirnatem satovju. Ko presežemo maksimalno silo, se pena poruši in sila rahlo pade. Kljub znižanju potrebne sile za stiskanje, poskus nadaljujemo in opazimo, da se na določeni stopnji material za sredico prične zgoščevati in sila začne ponovno naraščati.

Tlačna trdnost plošč z MDF trakovi je višja kot tlačne trdnosti pri plošči iz satovja oz. EPS-a. MDF trakovi omogočajo visok odpor proti stiskanju in tako omogočijo razmeroma visoke tlačne trdnosti. Plošče samo z mrežo prenesejo visoko obremenitev, ampak se ob prekoračitvi popolnoma porušijo. Plošče s kombinacijo s poliuretansko peno pa ob porušitvi mreže še vedno ohranijo strukturo in se v nadaljevanju obnašajo podobno kot plošče s sredico iz EPS-a.



Slika 23: Primerjava tlačnih trdnosti



Slika 24: Primerjava maksimalnih sil pri tlačni obremenitvi

Pri ploskovni tlačni obremenitvi plošč s sredico iz papirnatega satovja (slika 26) je zelo kmalu prišlo do porušitve strukture. Ploščo smo po porušitvi pustili v stroju in spremljali dogajanje med stiskanjem plošče. Preizkušane se je med delovanjem sile močno

deformiral (slika 25). Plošče so do porušitve prenesle visoke obremenitve, ki nakazujejo, da je tlačna trdnost po ploskvi dobra. Do porušitve je prišlo zaradi tankih sten satovja, ki niso bile zmožne prenesti tako visokih sil. Po porušitvi se je satovje zmečkalo in ni bilo zmožno opravljati več svoje podporne funkcije.



Slika 25: Prikaz deformacije pri tlačni obremenitvi



Slika 26: Tlačno obremenjevanje plošče s sredico iz papirnatega satovja

Plošče s sredico iz stirodurja imajo rahlo višjo tlačno trdnost kot plošče s papirnatim satovjem in posledično dosegajo tudi višje sile pri tlačni obremenitvi (slika 27).



Slika 27: Tlačno obremenjevanje plošče s sredico iz EPS-a

Sile pri tlačni obremenitvi po ploskvi dosegajo primerljive vrednosti tistim pridobljenim pri preizkusu obremenitve po robu. Je pa potrebna precej višja deformacija materiala, da dosežemo to silo. Material se je sprva dobro upiral obremenitvi, pri neki sili pa se je pojavila izboklina na peni, ki je zaznamovala porušitev materiala. Kljub porušitvi je pena še naprej ohranila večino oblike in se je začela zgoščevati zaradi stiskanja. Zaradi polne strukture je bila porušitev manj opazna.

Pri obremenjevanju plošče s sredico iz MDF mreže (slika 28) smo opazili zdrs in tudi lom trakov (podpornih elementov).



Slika 28: Tlačno obremenjevanje plošče z MDF mrežo

Zaradi debelih sten (debelina trakov) je takšna izvedba plošče dobro odporna na tlačne obremenitve. Iz slike je razvidna struktura mreže in material uporabljen za sredico laboratorijskih plošč. Mreža (sredica) in zunanja sloja so zlepljeni s poliuretanskim lepilom, ki zaradi ekspanzije v fazi utrjevanja omogoči večjo stično površino. Zaradi dovolj goste mreže lahko dosega visoke maksimalne sile (slika 24).



Slika 29: Tlačno obremenjevanje po ploskvi plošče z MDF mrežo in PUR peno

Laboratorijsko izdelana plošča s sredico iz MDF plošč in poliuretanske pene (slika 29) dosega višje maksimalne sile kot plošča z mrežo brez pene. Na osnovi rezultatov je bilo razvidno, da do loma sicer pride pri primerljivih silah, vendar plošča s peno po lomu mreže še vedno ostane kompaktna in se ne poruši. Zaradi pene se material po lomu mreže obnaša kot plošča s sredico iz stirodur pene. S slike je razvidno, kako se porušijo letvice, ki gradijo mrežo, vendar jih poliuretanska pena ohrani na mestu.

Na sliki 30 in sliki 31 je razvidno, da ob tlačni obremenitvi plošč po robu večino nosilnosti opravi zunanji sloj.



Slika 30: Preizkus tlačne trdnosti preizkušanca zasnovanega v laboratoriju



Slika 31: Prikaz loma plošče s sredico iz papirnatega satovja zaradi obremenjevanja po robu



Slika 32: Prikaz loma plošče s sredico iz EPS zaradi obremenjevanja po robu

Sredica preprečuje uklon zaradi vitkosti in zato je mogoče doseči višje sile in višjo tlačno trdnost (preglednica 2). Ko postanejo sile, ki želijo zunanji sloj ukloniti, previsoke za lepilni spoj, ta popusti in nastanejo takšne poškodbe. Material je popustil na območjih slabše zlepljenosti, kjer se je pojavil, nato tudi lom zunanjega sloja in ločitev od sredice.

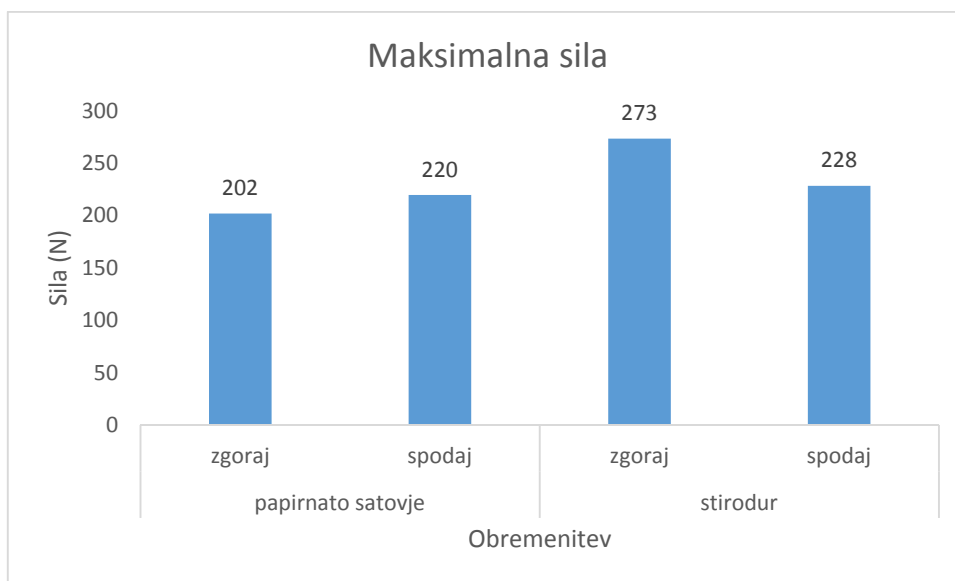
4.4 ČVRSTOST POVRŠINE

Preizkus čvrstosti površine smo izvajali le na plošči s sredico iz papirnatega satovja in EPS. Ta test nam je pomagal ugotoviti nekatere prednosti in slabosti obeh materialov. Rezultati so prikazani v preglednici 3, na sliki 33 in na sliki 34.

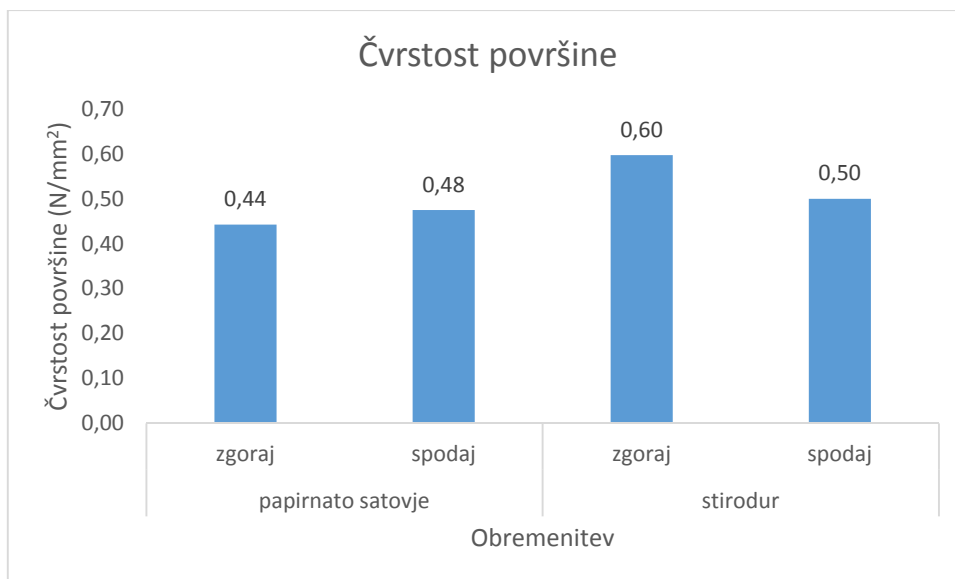
Preglednica 3: Čvrstost površine

Vrsta sredice	Stran obremenitve	F _{max} (N)	f(N/mm ²)
papirnato satovje	zgoraj	202	0,44
	spodaj	220	0,48
EPS	zgoraj	273	0,60
	spodaj	228	0,50

Iz preglednice 3 je razvidno, da EPS dosega višje maksimalne sile in napetosti, kar je posledica majhne stične površine sredice s papirnatim satovjem z zunanjim slojem (slika 35). Na sliki 34 je razvidno tudi, da se napetosti ob poružitvi materiala razlikujeta glede na to ali obremenjujemo zgornjo stran ali spodnjo. Pri EPS se je izkazalo, da se boljše obnese zgornja stran, pri satovju pa spodnja. Pri satovju se bolje obnese spodnja stran, ker je bilo tam omogočeno boljše oblivanje lepila okoli sten. Na zgornji strani je lepilo ponekod odtekalo v prazne prostore in ni pripomoglo k oblepljanju. Pri EPS pa je bila bolj kvalitetna stran zgornja prav zaradi tega odtekanja lepila v prazne prostore in to je omogočilo mehansko sidranje lepila. Na spodnji strani pa je bila zlepljenost le med površinama in lepilo ni toliko prodiralo v material za sredico.



Slika 33: Maksimalna sila pri določanju čvrstosti površine



Slika 34: Čvrstost površine

Glede na rezultate lahko ugotovimo, da papirnato satovje prenese presenetljivo veliko nateznih napetosti glede na stično površino, ki je mnogo manjša kot pri EPS.



Slika 35: Preizkušanci za testiranje čvrstosti površine

Pri preskusu smo ugotovili, da so se preizkušanci s sredico iz satovja (slika 36) obnašali drugače kot tisti s sredico iz stirodurja.



Slika 36: Izvajanje preizkusa čvrstosti površine

Pri preizkušanih s sredico iz satovja ni prišlo do nenadnega loma ampak se je začela deformirati celotna struktura. Pri preizkušanih s sredico iz stirodurja pa je prišlo do nenadnega loma in odtrganja pečata s površine. Preizkušanci so prenašali visoke obremenitve in iz tega smo sklepali, da je bila zlepljenost kvalitetna.



Slika 37: Stična površina med zunanjim slojem in papirnatim satovjem

Iz slike 37 je razvidna struktura satovja. Vidimo, kako majhna je pravzaprav stična površina med satovjem in zunanjim slojem.

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

Pri diplomskem projektu smo izdelali štiri lahke lesne ploščne kompozite z različnimi sredicami in sicer so bile sredice iz papirnatega satovja, EPS-a, MDF trakov ter MDF trakov v kombinaciji s PUR peno.

Papirnato satovje nam omogoča izdelavo lahkega ploščnega kompozita z nizko gostoto in nizko površinsko maso. Slabost satovja pa se pojavi pri slabši tlačni trdnosti, ki je znašala $0,82 \text{ N/mm}^2$. Papirnato satovje se razmeroma hitro poruši in deformira. Iz tega razloga smo potrebovali nek material, ki bi zapolnil prazne prostore v strukturi satovja in tako stabiliziral strukturo. Materiali kot je EPS in ostali lahki polni materiali pa nam zagotavljajo višjo tlačno trdnost in posledično tudi upogibno trdnost. Tlačna trdnost EPS-ja je znašala $0,6 \text{ N/mm}^2$ več kot pri papirnatem satovju. Pomanjkljivost satovja je prav v majhni stični površini in majhni debelini sten. To se je pokazalo tako v preizkusu tlačne trdnosti kot tudi pri preizkusu čvrstosti površine.

Papirnato satovje je narejeno iz majhnih podpornih elementov, ki so debeline le $0,28 \text{ mm}$. Poleg teh šibkih točk ima satovje v svoji strukturi še veliko praznih prostorov, ki ne pripomorejo k izboljšanju mehanskih lastnosti. To lahko izboljšamo že samo z gostoto uporabljenega satovja. V primeru uporabe polne sredice (EPS) se število teh podpornih elementov poveča in se tako izboljša tlačna in upogibna trdnost ter čvrstost površine. Zaradi večjega števila podpornih elementov se pri takšnem materialu sile precej bolj prenašajo na spodnjo ploskev in tako pride do višjih strižnih obremenitev materiala. Posledica tega je zdrs med ravninami, česar pa pri papirnatem satovju ni bilo.

Iz teh prednosti in slabosti smo sklepali, da bi bilo potrebno izdelati ploščo, pri kateri bi za sredico uporabili nekakšno mrežo, ki bi jo zapolnili z lahkimi materiali (polna struktura). V primeru mreže brez pene prihaja do zdrsov med ploskvami materiala in zato je potrebno uporabiti peno, ki stabilizira celotno strukturo. Pri tlačni obremenitvi pride pri papirnatem satovju in pri mreži iz MDF letvic do porušitve podpornih elementov in razpada strukture. V primeru toge konstrukcije mreže je potrebno, da dodamo polnilo iz pene in ta prepreči zdrs in porušitev ter omogoči, da ostane struktura še naprej stabilna. Kot slabost se je pokazal EPS, ker bi ga bilo potrebno za vsak prostorček posebej natančno izrezovati in dimenzionirati (slika 9). S tem razlogom smo uporabili poliuretansko peno, ki smo jo lahko vlili v mrežo. Pri vlivljanju smo morali biti pozorni le na količino pene, ker bi v primeru premajhne količine v materialu ostal zrak in bi bile mehanske lastnosti slabše, v primeru prevelike količine pa bi prišlo do odrivanja zgornje ploskve in večje debeline plošče. V našem primeru je prišlo prav do slednjega pojava. V nadaljevanju bomo poiskali primerno količino te pene in primeren tlak stiskanja, da ne bomo porušili podpornih elementov in da bomo hkrati omogočili optimalno zgostitev materiala. Ugotovili smo, da nam je uspelo

znatno izboljšati tlačno trdnost materiala, ker le-ta dosega dvakrat višje vrednosti kot papirnato satovje in EPS, ni pa nam uspelo izboljšati upogibne trdnosti.

5.2 SKLEPI

Pri diplomskem delu smo ugotovili, da:

- sredica s papirnatim satovjem slabše prenaša tlačne obremenitve kot sredica s peno,
- sredica iz pene prenaša več sil na spodnji zunanji sloj kot sredica iz papirnatega satovja in zato pride do loma spodnjega zunanjega sloja,
- se upogibna trdnost plošč s sredico iz papirnatega satovja in pene ne razlikuje veliko,
- pri plošči, ki smo jo izdelali sami, nismo uspeli izboljšati upogibne trdnosti in je ostala primerljiva klasičnim kompozitom,
- smo pri plošči, ki smo jo izdelali sami uspeli precej izboljšati tlačno trdnost v primerjavi s klasičnimi ploščami.

6 VIRI

- AURE. 2003. Toplotnoizolacijski materiali.
<http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/PDFknjiznjicaAURE/IL2-03.PDF>
(24.7.2016)
- Barbouts I., Vassilios V., 2013. Strenght properties of lightweight paper honeycomb panels for the furniture.
<http://users.auth.gr/jbarb/Publications/lightweight%20honeycomb%20furniture.pdf>
(24.7.2016)
- Bitzer T. 1997. Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing. London. Chapman & Hall: 233 str.
- Hudnik T. 2010. Razvoj lahkih ploščnih kompozitov s sredico iz utekočinjenega lesa. Dipl. delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 44 str.
- Medved S. 2008. Lightweight Wood-Based Composites; Production, Properties and Usage. Bled. COST E49: 145 str.
- Petras A. 1998. Design of Sendwih Structures. Dissertation, Cambridge, Cambridge University Engeneering Department: 99 str.
- Polistiren 2016
https://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene#Expanded_polystyrene_.28EPS.29
(24.7.2016)
- Poliuretanska pena (24.7.2016)
<https://www.google.com/patents/US6423755> (24.7.2016)
- Petrič M. 2008. Nelesni materiali v izdelkih lesnopredelovalne in pohištvene industrije. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 148 str.
- Resnik J. 1997. Lepila in lepljenje lesa. Ljubljana. Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 103 str.
- Shalbafan A. 2013. Investigation of Foam Materials to be Used in Lightweight Wood-Based Composites. Dissertation. Hamburg, Hamburg University, Faculty of Mathematics, Informatics and Natural Sciences: 203 str.
- Sok B. 2013. Izdelava lahkega ploščnega kompozita s 3D oblikovano sredico. Dipl. delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 43 str.

Stirodur 2016

<http://www.intcorecycling.com/what-is-xps.html> (24.7.2016)

Thoemen H., Irle M., Šernek M. 2010, Wood-Based Panels. London, Brunel University Press: 278 str.

Thoemen H. 2008. Lightweight panels for the European furniture industry: Some recent developments. V: Cost Action E49 International Workshop in Slovenia on Lightweight Wood-based Composites-Production, Properties and Usage: 1-14

ZAHVALA

Zahvalil bi se rad mentorju izr. prof. dr. Sergeju Medvedu za vso pomoč in napotke pri izdelavi diplomskega projekta, zahvalil bi se tudi prof. dr. Milanu Šerneku za recenzijo diplomskega projekta. Zahvalil bi se tudi vsem profesorjem Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani za trud v času mojega študija. Pozabiti ne smem tudi na vse ostale delavce Oddelka za lesarstvo. Iskreno zahvalil pa bi se tudi staršem in prijateljem, ki so mi ves čas stali ob strani. Hvala.