

LEPLJENJE LESA Z LEPILOM IZ ODPADNEGA POLISTIRENA

Sprejeto

17. 9. 2021

Recenzirano

29. 12. 2021

Izdano

30. 4. 2022

**Izvirni znanstveni
članek****Biotehnika:
Gozdarstvo, lesarstvo
in papirništvo****Ključne besede:**lepljenje,
lepilni spoj,
les,
polistiren,
reciklaža

MILAN ŠERNEK & ALJAŽ KORDIŠ

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Ljubljana, Slovenija.
E-pošta: milan.sernek@bf.uni-lj.si, ak9315@student.uni-lj.si

DOPISNI AVTOR

milan.sernek@bf.uni-lj.si

Povzetek Vsako leto svet proizvede čedalje več obstojnih plastičnih odpadkov, ki se kopičijo v naravi. Ena izmed rešitev je njihova reciklaža in ponovna uporaba za izdelavo novih izdelkov ali polizdelkov. Reciklirana plastika, predvsem termoplasti, imajo potencial tudi v lesarstvu. V naši raziskavi smo iz odpadnih kavnihi lončkov in žličk iz polistirena ter s topilom dimetilformamid izdelali lepilni mešanici in izdelali lepljence iz lesa za ugotavljanje strižne trdnosti lepilnih spojev po standardu SIST EN 205:2016. Uporabili smo dve temperaturi stiskanja (150 °C in 120 °C) ter štiri načine temperiranja oziroma ohlajanja lepljencev pred odprtjem stiskalnice. S primerjavo različnih postopkov lepljenja smo ugotovili, da lepilo iz lončkov najvišjo trdnost doseže po ohladitvi lepljencev na 75 °C preden smo jih vzeli iz stiskalnice, medtem ko lepilo iz žličk po hlajenju lepljencev na 100 °C ali 25 °C. Ugotovili smo tudi, da se s hlajenjem lepljencev na nižjo temperaturo pred odprtjem stiskalnice bistveno zmanjša variabilnost rezultatov, kar priča o bolj zanesljivih lepilnih spojih. Zahteve standarda SIST EN 204:2016 smo uspeli doseči z lepljencem, ki je bil zlepljen z lepilom iz lončkov pri temperaturi 150 °C in ohlajen na 75 °C preden smo ga vzeli iz stiskalnice.



BONDING OF WOOD WITH THE ADHESIVE FROM WASTE POLYSTYRENE

MILAN ŠERNEK & ALJAŽ KORDIŠ

University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science,
Ljubljana, Slovenia.
E-mail: milan.sernek@bf.uni-lj.si, ak9315@student.uni-lj.si

CORRESPONDING AUTHOR
milan.sernek@bf.uni-lj.si

Abstract Each year the world produces more and more durable plastic waste, which is accumulating in nature. One of the solutions to ease its impact is to recycle and reuse it for new products and intermediate products. Recycled plastic, especially thermoplastic, has great potential in the wood industry. In our research, we have used waste coffee cups and spoons made of polystyrene to make two adhesive mixtures, using dimethylformamide as a solvent. To establish the shear strength of adhesive bonds, we made bonded wood panels according to the instructions by standard SIST EN 205:2016. The idea was to optimize the temperature of hot pressing and to add a cooling procedure to ensure better shear strength of the bond, which is needed to reach the minimum criteria of the SIST EN 204:2016 standard. We used two temperatures for hot pressing (150 °C and 120 °C) and four ways of panel cooling in a closed press. After trying out different procedures, we came to the conclusion that the best way to use a coffee cup adhesive is to cool it down to 75 °C, while for the spoon-based adhesive the best bonding method is to cool the joints down to 100 °C or 25 °C. We also found that by cooling the panels in a closed press the consistency of the results increases, which makes the adhesive bonds more reliable. We managed to reach standard criteria with a sample which had been glued with coffee cup adhesive, hot pressed at 150 °C and cooled down to 75 °C before being taken out of the press.

Accepted
17. 9. 2021

Revised
29. 12. 2021

Published
30. 4. 2022

Original science
article

Biotechnology:
Forestry,
woodworking and
papermaking

Keywords:

gluing,
adhesive
bond,
wood,
polystyrene,
recycling

1 Uvod

Človeštvo pozna plastiko že več kot stoletje. Izum prvega popolnoma sintetičnega materiala sega v leto 1907, ko je belgijsko-ameriški kemik in izumitelj Leo Hendrik Baekeland pod visokim tlakom in temperaturo zmešal fenol s formaldehidom in izdelal prvi sintetični duromer, poimenovan bakelit (Pelley, 2018). Razmah produkcije in uporabe plastičnih izdelkov se je pričel v 50-ih letih prejšnjega stoletja. Sprožila ga je kombinacija dejavnikov, med katere prištevamo predvsem nagel porast svetovne populacije po drugi svetovni vojni ter želja ljudi po boljšem in kvalitetnejšem življenju (Achilias in sod., 2012). S pojmom plastika ne označujemo le enega materiala, temveč ta zajema širok spekter materialov, ki se medsebojno razlikujejo po njihovih lastnostih in sestavi (Pintarič T. in Pintarič F., 2017). Posledično plastika nudi številne možnosti uporabe v različnih panogah, kot so na primer embalažna, tekstilna, avtomobilska in vesoljska industrija, pa tudi informatika, medicina, transport in podobno.

Z leti se je količina plastičnih izdelkov vztrajno povečevala, kar je posledica njenih številnih dobrih lastnosti. Med najpomembnejše spadajo njena dolga življenjska doba, enostavna produkcija in nizka cena (Miller, 2020). Med pomembne lastnosti uvrščamo še inertnost in kemično odpornost, pa tudi odlične mehanske lastnosti. Natezna trdnost na enoto mase je v nekaterih primerih lahko kar 80-krat večja kot pri jeklu (Pintarič T. in Pintarič F., 2017).

Skozi leta uporabe pa se je pokazala tudi negativna plat plastičnih izdelkov. Večina najprej pomisli na odpadno plastično embalažo, vendar pa se prva težava plastičnih mas pojavi že v fazi njihovega nastanka. Plastika je namreč izdelana iz fosilnih goriv, ki spadajo v skupino neobnovljivih virov energije, večinoma pa se v ta namen uporabljata nafta in zemeljski plin (Miller, 2020). Druga slabost plastike je njena trpežnost in obstojnost v naravi. Ker masovna produkcija plastike traja približno 70 let, njena časovna obstojnost v okolju ni popolnoma jasna. Velika večina plastičnih izdelkov ni biološko razgradljivih, strokovnjaki pa so mnenja, da se takšni odpadki v okolju obdržijo več sto let, če ne celo tisočletje (Hopewell in sod., 2009). V tesni povezavi z biološko obstojnostjo plastike je povezan problem kopičenja plastičnih odpadkov v okolju. Problematična je predvsem embalaža za enkratno uporabo za hrano in pijačo, ki je v uporabi tako rekoč le nekaj minut, preden jo dokončno zavržemo, ta pa največkrat konča v rekah ali oceanih. Raziskovalci so ugotovili, da približno 80 % vseh odpadkov v oceanih predstavlja plastika, od tega največji delež

ravno embalaža za enkratno uporabo, kot so na primer plastenke, plastični jedilni pribor, slamice in ovitki za hrano. Kljub prizadevanjem za zmanjšanje onesnaževanja, vsako leto v oceanih konča približno 8 milijonov ton plastičnih odpadkov (Morales-Caselles in sod., 2021). Problematična je tudi mikroplastika, ki nastane kot posledica degradacije večjih kosov plastike. Slednja razpade zaradi destruktivnih sil abiotskih dejavnikov, kot so na primer abrazija vetra in morskih valov, pa tudi UV svetloba sonca. Ker mikroplastika ni biorazgradljiva, se ta nabira praktično v vseh kotičkih sveta – v oceanih, sladkovodnih ekosistemih, zemlji in zraku ter pomembno vpliva na zdravstveno stanje organizmov (Rogers, 2020).

S perečim problemom kopičenja odpadne plastike v okolju se ukvarjajo številni raziskovalci, ki so mnenja, da bi lahko onesnaževanje okolja vsaj delno omejili s ponovno uporabo plastičnih izdelkov in njihovo reciklažo. Prvi pojem se nanaša na plastične izdelke, katerih po prvi uporabi ne zavržemo, temveč jih večkrat uporabimo za isti ali drugačen namen. Na ta način se zmanjša potreba po novih izdelkih, obenem pa razbremenimo odlagališča z odpadki. Ko plastični izdelki dokončno odslužijo svojemu namenu, sledi reciklaža, če je ta le možna.

S terminom recikliranje ne zajamemo enotnega procesa, temveč je ta precej bolj kompleksen in včasih nejasen, saj zajema širok nabor postopkov in aktivnosti. V osnovi recikliranje polimernih mas delimo na štiri različne načine: primarno, sekundarno, terciarno in kvartarno reciklažo (Hopewell in sod., 2009). Primarni postopek omogoča predelavo plastičnih odpadkov na enako kakovostno raven, kakršno so imeli izdelki ob svojem nastanku. Pravimo, da reciklirana plastika ohrani mehanske lastnosti, kar pa je v praksi zelo težko izvedljivo. Veliko bolj pogost je sekundarni postopek, kjer se kakovost reciklirane plastike z vsakim ponavljajočim se ciklom reciklaže poslabša. Zaradi povišane temperature se krajšajo makromolekulske verige, s tem pa se poslabšajo mehanske lastnosti plastike. Terciarno reciklažo imenujemo tudi kemična reciklaža. Gre za proces, pri katerem se izvede popolna depolimerizacija polimerov v monomere. Prednost postopka je v regeneraciji petrokemičnih sestavin polimerov, ki se lahko uporabijo za ponovno polimerizacijo plastike ali drugih sintetičnih materialov. Žal pa v praksi tak postopek ni ekonomičen, saj je cena fosilnih goriv in posledično njihova predelava v plastične mase nižja od kemično recikliranih petrokemikalij (Hopewell in sod., 2009; Achilias in sod., 2012). Zadnja, kvartarna reciklaža, je sinonim za energetska izraboplastičnih odpadkov s sežiganjem v sežigalnicah. S tem se v določeni meri izkorišča energija, ki je shranjena v plastičnih odpadkih in sicer za proizvodnjo električne ali toplotne

energije. Ta oblika ravnanja z odpadki je primerna predvsem za visoko mešane plastične odpadke, kjer je njihova separacija težko izvedljiva, kar onemogoča proces reciklaže.

Recikliranje odpadne plastike za lepljenje lesa in lesnih kompozitov je tematika, ki ni popolnoma nova, temveč so se s tem izzivom soočili že številni raziskovalci, med katerimi so nekateri prišli do zelo obetavnih rezultatov.

Dotun in sod. (2018) so iz iveri in recikliranega polietilen tereftalata (PET) uspeli izdelati iverne plošče z različnimi masnimi razmerji polimerov in iverja. Ugotovili so, da se s povečevanjem deleža polimerov (od 10 % pa vse do 50 %) večja tudi gostota iverne plošče, obratno pa velja za absorpcijo vode in debelinski nabrek. Slednja se zaradi manjšega masnega deleža iveri zmanjšata, kar kompozitu zagotavlja ugodnejše fizikalne lastnosti, ki ustrezajo mednarodnim standardom za notranjo uporabo. Slabše rezultate so dosegli pri preverjanju mehanske trdnosti iverne plošče, izmed katerih se je najbolje obnesel kompozit z masnim razmerjem 1:1. Najvišja izmerjena upogibna trdnost plošče je znašala 9 N/mm².

Chun in sod. (2018) so s kombiniranjem lesa, vlaken koruznega ličja in reciklirane polistirenske pene izdelali lesno-plastični kompozit (WPC). Ugotovili so, da se natezna trdnost, modul elastičnosti in termična stabilnost povečujejo z večanjem deleža vlaken koruznega ličja. Po drugi strani pa se na račun taistih vlaken povečata absorptivnost vode in hitrost termičnega razpada. Z alkalnim tretiranjem kompozita pa jim je uspelo omenjene lastnosti še izboljšati. Natezna trdnost kompozita je tako dosegla vrednost 17 N/mm², kar sicer še ne dosega nivoja komercialnih kompozitov, so pa rezultati vsekakor vzpodbudni.

V raziskavi, ki so jo opravili Cui in sod. (2010), so namesto tradicionalnih adhezivnih sredstev za izdelavo vezanih plošč uporabili reciklirane plastične nakupovalne vrečke, izdelane iz polietilena, polipropilena, polivinil klorida in polistirena. Vezane plošče so izdelali pri različnih pogojih stiskanja in testirali vpliv količine plastike, ki ob vročem stiskanju tvori viskozen lepilni film. Ugotovili so, da je idealna količina plastičnega materiala v lepilnem spoju 100 g/m². Najboljšo trdnost lepilnih spojev so dosegli pri temperaturi 150 °C po šestih minutah stiskanja. Višanje temperature stiskanja ali podaljševanje časa stiskanja negativno vpliva na trdnost lepilnih spojev.

Iz pregleda relevantnih raziskav je razvidno, da ima odpadna plastika v lesarstvu velik potencial. Termoplasti so se izkazali za obetavno sestavino pri izdelavi lesno-plastičnih kompozitov, ki so v kombinaciji z naravnimi sestavinami (lesna moka, vlakna) mehansko ojačani in okolju prijaznejši. Podobno velja za termoplastična lepila iz reciklirane plastike, ki predstavljajo alternativo konvencionalnim formaldehidnim lepilom. Vsekakor pa so na teh področjih potrebne dodatne raziskave, ki bodo zagotovile podlago za morebitno komercialno uporabo.

V naših preliminarnih raziskavah (Šernek in sod., 2020) smo ugotovili, da rezultati lepljenja lesa z lepili iz odpadnega polistirena iz odpadnih plastičnih lončkov in žličk, ki je bil raztopljen v različnih topilih, nakazujejo potencial za nadaljnji razvoj. Cilj predstavljene raziskave je bil uporabiti najbolj obetajočo lepilno mešanico in optimizirati postopek lepljenja z namenom doseganja čim višje strižne trdnosti lepilnih spojev. Pri lepljenju smo spreminjali temperaturo stiskanja in način hlajenja lepljencev v zaprti stiskalnici pred njenim odprtjem, da bi dosegli čim boljšo kakovost zlepljenosti. Praktičen cilj raziskave je bil, da pri optimalnih parametrih lepljenja dosežemo zahteve standarda za plastomerna lepila za les za nekonstrukcijsko uporabo.

2 Materiali in metode

2.1 Materiali

V raziskavi, ki je potekala v okviru diplomske naloge (Kordiš, 2021), smo uporabili lesene lamele in dve lepilni mešanici. Lamele smo izdelali iz bukovine (*Fagus sylvatica* L.) s povprečno gostoto 680 kg/m^3 , ki smo jo klimatizirali v standardni klimi s temperaturo $20 \text{ }^\circ\text{C}$ in relativno zračno vlažnostjo 65 %, kjer je les dosegel 12 % povprečno ravnovesno vlažnost. Lepilni mešanici smo pripravili iz polistirena iz kavnih lončkov in žličk (slika 1), ki smo jih raztopili v topilu dimetilformamid (DMF) (99,8 %) proizvajalca Carl Roth GmbH + Co KG. Kavne žličke smo zdrobili, lončke pa narezali na manjše koščke, da smo jih učinkoviteje raztopili v topilu DMF. Razmerje med suho snovjo odpadnega polistirena iz žličk ali lončkov in topila DMF je bilo 1:2. Lepilni mešanici smo dobro premešali in zaprli v stekleni posodi.



Slika 1: Kavni lonček in žlički iz polistirena

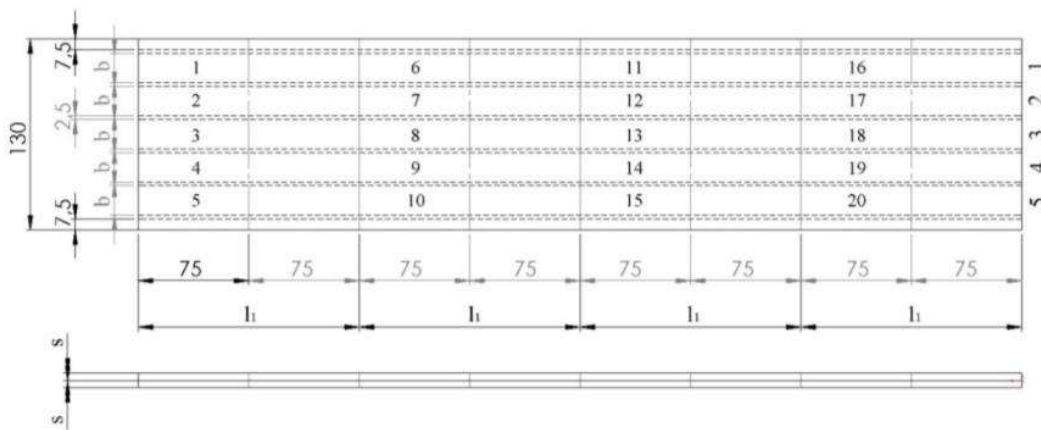
Vir: Lasten

2.2 Izdelava preizkušancev za testiranje lepilnih spojev

Kakovost zlepljenosti smo ugotavljali po standardu SIST EN 205:2016, ki se nanaša na lepila za les za nekonstrukcijsko uporabo. Uporabili smo bukove lamele dimenzij 600 mm x 130 mm x 5 mm iz katerih smo zlepili dvoslojne lepljence. Površino za lepljenje smo poskobljali tik pred nanosom lepilne mešanice, tako da je bila ta sveže pripravljena, brez prahu in ostalih nečistoč. Nanos lepilne mešanice je znašal 300 g/m², kar pomeni, da je znašala količina suhe snovi polistirena 100 g/m² na lepilni spoj. Lepljenje smo izvedli v vroči stiskalnici, kjer smo dvoslojne lepljence stiskali 10 minut pri specifičnem tlaku 12 barov. Pri tem smo variirali temperaturo stiskanja in temperaturo odvzema iz stiskalnice, ker je polistiren termoplastičen material in ga je smiselno pred odprtjem stiskalnice ohladiti. Temperaturi stiskanja sta bili 120 °C in 150 °C, medtem ko smo uporabili štiri načine temperiranja/hlajenja pred odvzemom lepljencev iz stiskalnice:

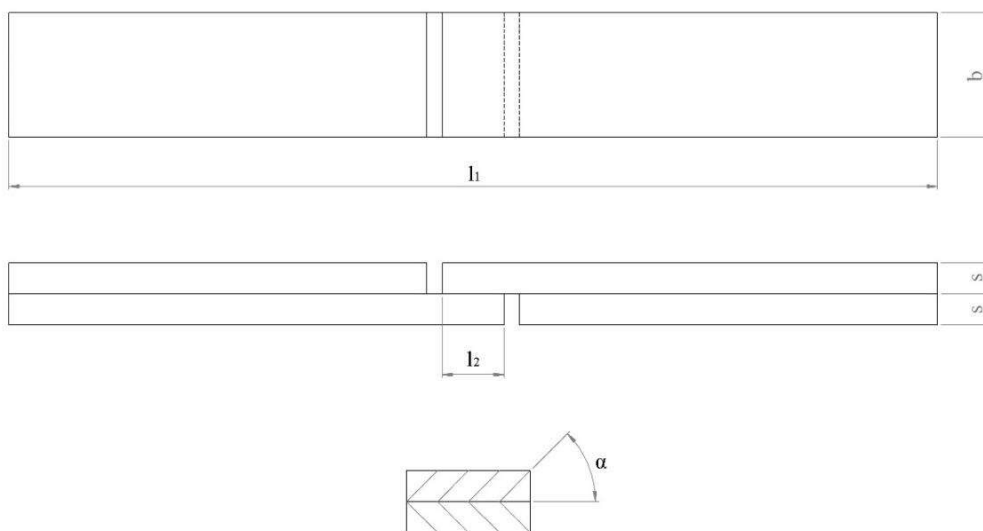
- brez ohlajanja,
- ohlajanje lepljencev pod tlakom na 100 °C,
- ohlajanje lepljencev pod tlakom na 75 °C,
- ohlajanje lepljencev pod tlakom na 25 °C.

Za določitev točne temperature odvzema lepljencev iz stiskalnice smo uporabili termočen (tip J) in merilno napravo (Agilent, type 34970A). Skupno smo uporabili 8 različnih načinov stiskanja lamel in dve različni lepilni mešanici, kar pomeni, da smo zlepili 16 dvoslojnih lepljencev. Lepljence smo označili z oznako, ki je vključevala vrsto lepilne mešanice (Ž=žličke, L=lončki), temperaturo stiskanja in temperaturo odvzema iz stiskalnice. Vsak lepljenec smo po 7 dneh klimatiziranja v standardni atmosferi razžagali po načrtu (slika 2) na 20 preizkušancev za ugotavljanje strižne trdnosti lepilnih spojev (slika 3).



Slika 2: Načrt razžagovanja lepljencev v preizkušance

Vir: Lasten



Slika 3: Skica preizkušanca za ugotavljanje strižne trdnosti lepilnih spojev

Vir: Lasten

- $l_1 = (150 \pm 5)$ mm - Celotna dolžina preizkušanca
 $s = (5,0 \pm 0,1)$ mm - Debelina lamele
 $b = (20,0 \pm 0,2)$ mm - Celotna širina preizkušanca (širina strižne površine)
 $\alpha = 30^\circ$ do 90° - Kot med braniko in lepilno površino
 $l_2 = (10,0 \pm 0,2)$ mm - Dolžina preklopa (dolžina strižne površine)

2.3 Ugotavljanje strižne trdnosti lepilnih spojev

Ugotavljanje strižne trdnosti lepilnih spojev preizkušancev smo opravili z univerzalnim testirnim strojem ZWICK/Z005 po navodilih standarda SIST EN 205:2016. Vsakemu preizkušancu smo izmerili širino in dolžino strižne površine ter vrednosti vnesli v računalniški program testXpert II. Nato smo preizkušanelec vpeli v testirni stroj (slika 4) in ga strižno obremenili s hitrostjo 5 mm/min, tako da je do porušenja spoja prišlo v približno 30 sekundah. Stroj je zabeležil velikost sile loma na osnovi katere je bila izračunana strižna trdnost lepilnega spoja (τ) po enačbi (1):

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

τ - Strižna trdnost lepilnega spoja [N/mm²]

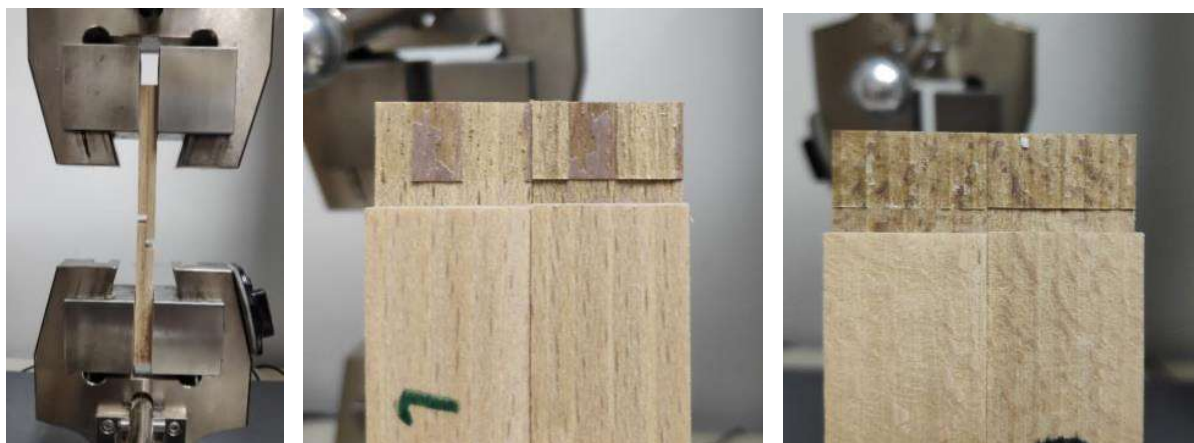
F_{max} - Izmerjena maksimalna sila [N]

A - Strižna površina [mm²]

l_2 - Dolžina strižne ploskve [mm]

b - Širina strižne ploskve [mm]

Po testu smo vizualno ocenili lom po lesu na strižni površini preizkušanca (slika 4). Oceno smo podali v odstotkih in sicer smo posamezno oceno loma zaokrožili na najbližjo vrednost od naslednjih: 0 %, 25 %, 50 %, 75 % in 100 %.



Slika 4: Vpetje preizkušanca v čeljusti testirnega stroja (levo), prikaz porušenega preizkušanca s 75 % lomom po lesu (sredina) in 0 % lomom po lesu (desno)

Vir: Lasten

3 Rezultati in diskusija

Lepljenje lesa z lepilno mešanico iz polistirena iz žličk in lončkov za kavo ter topila DMF je v nekaterih pogledih bistveno zahtevnejše, kot lepljenje s komercialnimi lepili za les. Visoka viskoznost obeh lepilnih mešanic je oteževala proces nanašanja, obenem pa je topilo hitro izhlapevalo, kar je onemogočalo enakomerno razporejanje lepila po površini lamele.

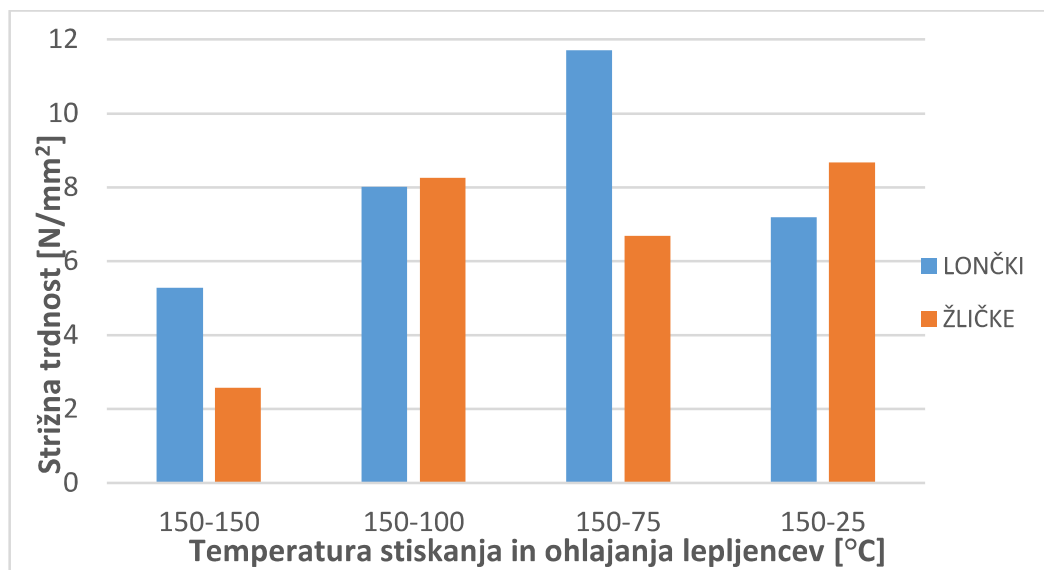
3.1 Strižna trdnost lepilnih spojev in delež loma po lesu

Ugotovili smo, da predvsem postopek hlajenja lepljenca pod tlakom pred odvzemom iz stiskalnice vpliva na strižno trdnost lepilnih spojev, medtem ko je bil vpliv temperature stiskanja manjši (preglednica 1). Delež loma po lesu je pri večini preizkušancev znašal 0 % ali pa je bil majhen, kar pomeni, da so lepilni spoji popustili zaradi slabe adhezije med lepilom in lesom. Ugotovili smo tudi določene razlike v strižni trdnosti spojev glede na vrsto lepilne mešanice (žličke ali lončki), kar je verjetno posledica dodanega barvila v lončke, medtem ko so bile prozorne žličke brez dodatkov. Zagotovitev enakomernega nanosa prozorne lepilne mešanice iz žličk je bila težja kot obarvane lepilne mešanice iz lončkov, zato so lepljenci iz žičk izkazovali večjo variabilnost v rezultatih zaradi neenakomernega nanosa lepilne mešanice.

Tabela 1: Povprečna strižna trdnost in delež loma po lesu preizkušancev zlepljenih z lepilno mešanico iz odpadnega polistirena pri različnih pogojih stiskanja in odvzemanja iz stiskalnice

TEM. STISKANJA	TEM. ODVZEMA IZ STISKALNICE	LEPILNA MEŠANICA	OZNAKA PREIZKUŠANCEV	STRIŽNA TRDNOST [N/mm ²]	% LOMA PO LESU [%]
150 °C	150 °C	Lončki	L 150-150	5,3	0
		Žličke	Ž 150-150	2,6	0
	100 °C	Lončki	L 150-100	8,0	23
		Žličke	Ž 150-100	8,3	16
	75 °C	Lončki	L 150-75	11,7	7,5
		Žličke	Ž 150-75	6,7	25
	25 °C	Lončki	L 150-25	7,2	0
		Žličke	Ž 150-25	8,7	3,8
120 °C	120 °C	Lončki	L 120-120	4,3	0
		Žličke	Ž 120-120	2,8	0
	100 °C	Lončki	L 120-100	7,5	1,3
		Žličke	Ž 120-100	9,4	11
	75 °C	Lončki	L 120-75	8,5	14
		Žličke	Ž 120-75	7,8	0
	25 °C	Lončki	L 120-25	8,2	14
		Žličke	Ž 120-25	9,4	8,8

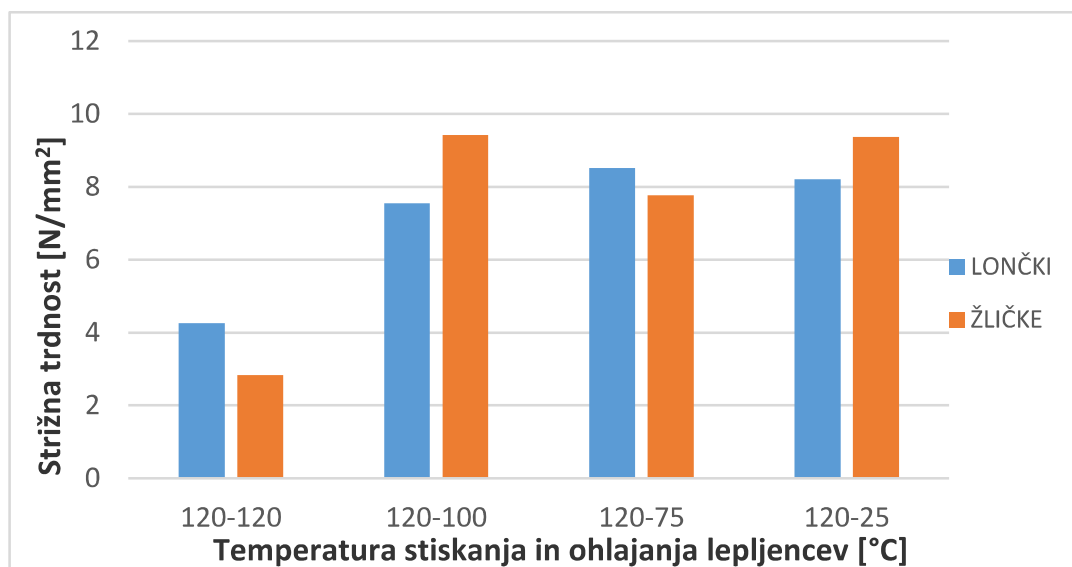
Analiza rezultatov lepljencev, ki smo jih stiskali pri 150 °C, je pokazala, da je bila najvišja strižna trdnost (11,7 N/mm²) dosežena z lepilno mešanico polistirena iz lončkov pri tistih lepljencih, ki smo jih pred odprtjem stiskalnice ohladili na temperaturo 75 °C, medtem ko je bil pri lepilni mešanici polistirena iz žličk najboljši rezultat (8,7 N/mm²) dosežen pri lepljencih, ki smo jih pred odprtjem stiskalnice ohladili na sobno temperaturo 25 °C. Po pričakovanjih so najmanjše vrednosti strižne trdnosti izkazovali lepljenci, ki smo jih iz stiskalnice vzeli pri 150 °C oziroma takoj po stiskanju brez hlajenja (150-150), neglede na vrsto lepilne mešanice (graf 1). Glede na zahteve standarda SIST EN 204:2016 lahko v trajnostni razred D1 uvrstimo lepilno mešanico polistirena iz lončkov (150-75), ki je z doseženo trdnostjo 11,7 N/mm² uspešno preseгла minimalno zahtevano vrednost (10 N/mm²).



Graf 1: Strižna trdnost lepilnih spojev preizkušancev stiskanih pri 150 °C

Vir: Lasten

Do podobnih ugotovitev smo prišli tudi pri vročem stiskanju pri 120 °C, le da tu nismo dosegli standardnih zahtev z nobenim od testiranih lepljencev (graf 2). Najvišjo in hkrati identično vrednost strižne trdnosti spojev so dosegli preizkušanci lepljeni z lepilno mešanico polistirena iz žličk pri hlajenju na 100 °C in 25 °C (9,4 N/mm²). Najnižje vrednosti strižne trdnosti spojev smo zopet ugotovili pri lepljencih, ki jih po stiskanju nismo ohlajali (120-120) in sicer 4,3 N/mm² z lepilno mešanico polistirena iz lončkov ter 2,8 N/mm² iz žličk.



Graf 2: Strižna trdnost lepilnih spojev preizkušancev stiskanih pri 120 °C

Vir: Lasten

Zanimiva je ugotovitev, da so imeli vsi preizkušanci, ki so bili po vročem stiskanju najprej ohlajeni in nato odvzeti iz stiskalnice, bistveno višjo strižno trdnost spojev kot lepljenci, ki so bili iz stiskalnice odvzeti takoj po stiskanju (150-150 in 120-120). V tem pogledu smo z vključitvijo faze hlajenja lepljencev pod tlakom takoj po vročem stiskanju dosegli bistveno izboljšanje trdnosti kot v preliminarni raziskavi (Šernek in sod., 2020), kjer smo lepljence vzeli iz stiskalnice brez hlajenja.

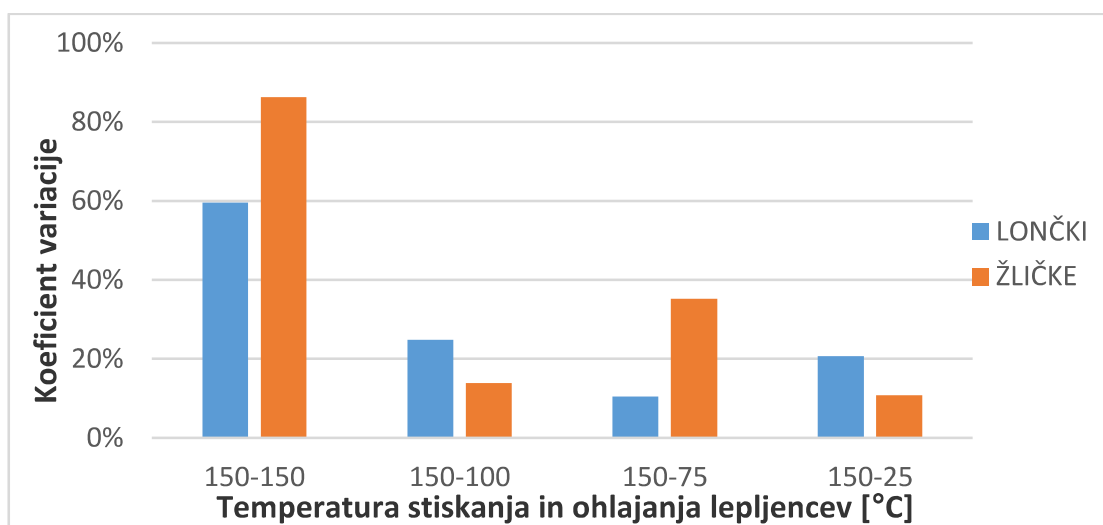
Primerjali smo tudi trdnosti lepilnih spojev iste lepilne mešanice pri različnih temperaturah stiskanja, saj je to zanimivo tudi iz ekonomskega vidika, kjer je razlika med porabo energije za segrevanje na 120 °C in 150 °C občutna. Poleg tega se za ohlajanje lepilnih spojev s 150 °C na izbrano nižjo temperaturo porabi več časa kot za ohlajanje s 120 °C, obenem pa lahko visoka temperatura povzroči večji temperaturni in vlažnostni gradient v lesu, kar negativno vpliva na trdnostne lastnosti lepilnega spoja. Lepljenec se zaradi povečanih notranjih napetosti po stiskanju zvije ali ukrivi, kar lahko rezultira celo v razzslojitvi zlepljenih lamel.

Pri lepilnih mešanicah polistirena iz lončkov velikih razlik glede na različni temperaturi stiskanja nismo opazili oziroma niso značilne. V vseh primerih, razen pri hlajenju na 25 °C, je bila strižna trdnost lepljencev stiskanih pri 150 °C nekoliko višja, če primerjamo isti postopek hlajenja. Obratno velja za lepilne mešanice polistirena iz žličk, kjer so se lepilni spoji v vseh štirih primerih hlajenja bolje obnesli po stiskanju pri 120 °C. Sklepamo lahko, da je povišana temperatura vsekakor bistvenega pomena za izhlapevanje topila, vendar ko ta enkrat preseže temperaturo steklastega prehoda polistirena (100 °C), potrebe po dodatnem segrevanju na bistveno višje temperature ni.

Že med izvajanjem strižnih testov smo opazili, da nekateri preizkušanci nehlajenih vzorcev dosegajo relativno visoke vrednosti, spet drugi zelo nizke. S preračunom variacijskega koeficienta, ki ga opisuje razmerje med standardnim odklonom in povprečno vrednostjo, smo ugotavljali variabilnost rezultatov testiranja. Prišli smo do spoznanja, da zdaleč največjo variabilnost izkazujejo preizkušanci, ki jih po vročem stiskanju nismo ohlajali. Predvsem je ta pojav moč zaznati pri lepilnih mešanicah iz žličk, ki so imele 86 % koeficient variacije pri 150 °C (graf 3), pri 120 °C pa 74 % (graf 4). Razlog za razliko med njima bi se lahko nahajal v fazi nanašanja lepilne mešanice na lamelo. Lepilo iz žličk je namreč brezbarvno, zato je bilo ob nanosu težko vizualno oceniti, kje je lepila zadosti in kje premalo, obenem pa je ročno nanašanje potekalo hitro z namenom, da bi preprečili izhlapevanje topila in

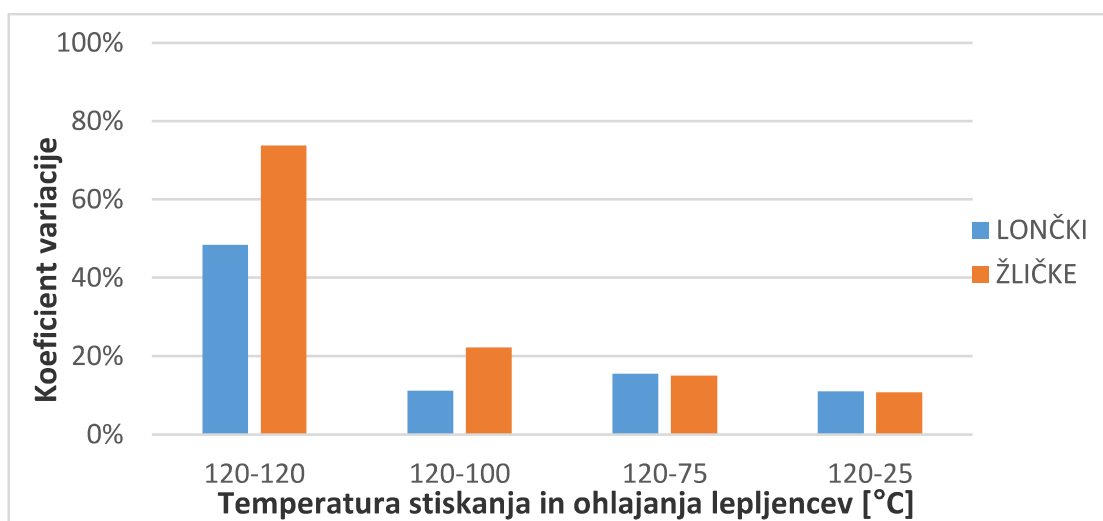
prehitro utrjevanje še pred stiskanjem. Skupek teh dejavnikov je povzročil neenakomerno porazdeljenost lepila po površini. Na predelih z ustreznim deležem lepila so preizkušanci dosegli relativno dobre rezultate, ne pa tudi preizkušanci, kjer je bilo lepila izrazito preveč ali premalo.

Ko je temperatura lepilnega spoja padla pod območje steklastega prehoda, je bil občuten tudi padec koeficienta variacije. Faza hlajenja tako ni izboljšala le strižne trdnosti, temveč je pomembno vplivala na manjšo variabilnost in večjo zanesljivost rezultatov.



Graf 3: Koeficient variacije rezultatov strižnega testa preizkušancev stiskanih pri 150 °C

Vir: Lasten



Graf 4: Koeficient variacije rezultatov strižnega testa preizkušancev stiskanih pri 120 °C

Vir: Lasten

4 Zaključki

Zaključimo lahko, da postopek hlajenja lepljencev v zaprti stiskalnici (pod tlakom) takoj po vročem stiskanju pozitivno učinkuje na strižno trdnost lepilnih spojev iz odpadnega polistirena. Najnižjo strižno trdnost spojev so izkazovali lepljenci, ki smo jih iz stiskalnice vzeli takoj po stiskanju brez hlajenja. Trdnost lepilnih spojev je bila po ohlajanju preizkušancev pred odvzemom iz stiskalnice na 100 °C, 75 °C ali 25 °C bistveno večja, značilnih razlik med njimi pa ni bilo. Prav tako so preizkušanci, ki so bili hlajeni pred odvzemom iz stiskalnice, izkazovali bistveno manjšo variabilnost v strižni trdnosti lepilnih spojev. Bistvenih razlik v strižni trdnosti lepilnega spoja med preizkušanci, ki so bili stiskani pri 120 °C in 150 °C, ni bilo. Zahteve za uvrstitev plastomernih lepil v trajnostni razred D1 (SIST EN 204:2016) je izpolnila le lepilna mešanica iz lončkov pri vročem stiskanju pri 150 °C in hlajenju na 75 °C pred odprtjem stiskalnice.

Rezultati so pokazali, da lepilo iz recikliranega polistirena (razen ene izjeme) tudi po optimizaciji parametrov stiskanja še vedno ni doseglo standardnih zahtev. S hlajenjem lepljencev pred odvzemom iz stiskalnice smo sicer dosegli občutno izboljšanje rezultatov, vendar slednji še vedno ne omogočajo zanesljive in varne uporabe v suhih razmerah. Zato bi bilo v nadaljevanju raziskav smiselno lepilne mešanice modificirati z dodatki, ki bi izboljšali adhezijo, obenem pa razviti hitrejši in enakomernejši način nanosa lepilne mešanice na površino lepljenja.

Zahvala

Raziskava je nastala v okviru programske skupine P4-0015, pod okriljem Agencije republike Slovenije za raziskovalno dejavnost (ARRS). Avtorja se zahvalujeta mag. Bogdanu Šegi in Juretu Žigonu za tehnično pomoč pri izvedbi raziskave.

Literatura in viri

- Achilias, D. S., Andriotis, L., Koutsidis, I. A., Louka, D. A., Naniias, N. P., Siafaka Tsagkalias, I. in Tsintzou, G. (2012). *Recent Advances in the Chemical Recycling of Polymers (PP, PS, LDPE, HDPE, PVC, PC, Nylon, PMMA)*. In Material Recycling – Trends and Perspectives, Ed.; Achilias D., London, InTechOpen, str. 64.
- Chun, K. S., Fahamy, N. M. Y., Yeng, C. Y., Choo, H. L., Ming, M. P. in Tshai, K. Y. (2018). *Wood plastic composites made from corn husk fiber and recycled polystyrene foam*. Journal of Engineering Science and Technology, 13, 11, str. 3445-3456.
- Cui, T., Song, K. in Zhang, S. (2010). *Research on utilizing recycled plastic to make environment-friendly plywood*. Forestry Studies in China, 12, 4, str. 218-222.

- Dotun, A. O., Adediran, A. A. in Oluwatimilehin, A. C. (2018). *Physical and Mechanical Properties Evaluation of Particle Board Produced from Saw Dust and Plastic Waste*. International Journal of Engineering Research in Africa, 40, str. 1-8.
- Hopewell, J., Dvorak, R. in Kosior, E. (2009). *Plastics recycling: Challenges and opportunities*. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 364, 1526, str. 2115-2126.
- Kordiš, A. (2021). *Lepljenje lesa z lepilom iz odpadnega polistirena*. Diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Ljubljana, str. 45.
- Miller, B. (2021). *17 Biggest Advantages and Disadvantages of Plastics*. Greengarageblog.org. Pridobljeno iz: <https://greengarageblog.org/17-biggest-advantages-and-disadvantages-of-plastics>
- Morales-Caselles, C., Viejo, J., Marti, E., Gonzalez-Fernandez, D., Pragnell-Raasch, H., González-Gordillo, J. I., Montero, E., Arroyo, G. M., Hanke, G., Salvo, V. S., Basurko, O. C., Mallos, N., Lebreton, L., Echevarria, F., Van Emmerik, T., Duarte, C. M., Galvez, J. A., Van Sebille, E., Galgani, F., Garcia, C. M., Ross, P. S., Bartual, A., Ioakeimidis, C., Markalain, G., Isobe, A. in Cozar, A. (2021). *An inshore-offshore sorting system revealed from global classification of ocean litter*. Nature Sustainability, 4, 6, str. 484-493.
- Pelley, J. (2021). *Plastic Contamination of the Environment: Sources, Fate, Effects, and Solutions*. Pridobljeno iz: <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/membership/acs/benefits/discovery-reports/plastics.pdf>
- Pintarič, T. in Pintarič, F. (2017). *Predelava plastičnih mas*. Pridobljeno iz: <http://www.razvoj-upd.si/wp-content/uploads/2017/07/17.-PREDELAVA-PLASTICNIH-MASTomaz-Pintaric.pdf>
- Rogers, K. (2021). *Microplastics*. Encyclopedia Britannica. Pridobljeno iz: <https://www.britannica.com/technology/microplastids>
- SIST, (2016). *Razvrstitev plastomernih lepil za les za nekonstrukcijsko uporabo (SIST EN 204:2016)*.
- SIST, (2016). *Lepila - Lepila za les za nekonstrukcijsko uporabo - Ugotavljanje natezno-strižne trdnosti spojev s preklonom (SIST EN 205:2016)*.
- Šernek, M., Turičnik V., Repič, R. in Šega B. (2020). *Uporaba odpadne plastike za izdelavo lepil za lepjenje lesa*. Les/Wood, 69, 2, str. 107-116