



VPLIV PLAZEMSKÉ OBDELAVE POVRŠINE LESA NA LEPLJENJE BUKOVINE S POLIURETANSKIM LEPILOM

INFLUENCE OF PLASMA SURFACE TREATMENT ON BONDING OF BEECH WOOD WITH POLYURETHANE ADHESIVE

Martin Capuder^{1,2}, Neja Bizjak Štrus², Sebastian Dahle², Bogdan Šega², Milan Šernek^{2*}

UDK članka: 630*824.85:52-726

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 14.10.2024

Sprejeto / Accepted: 17.10.2024

Izvleček / Abstract

Izvleček: V raziskavi je bil proučen vpliv plazemske obdelave površine na lepljenje bukovine s konstrukcijskim enokomponentnim poliuretanskim lepilom. Uporabljen je bil les navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.) brez obarvanja in les bukve z rdečim srcem, učinkovitost lepilnih spojev pa je bila ovrednotena s testiranjem strižne trdnosti in delaminacije v skladu s standardom SIST EN 14080:2013. Rezultati so pokazali, da je plazemska obdelava izboljšala omočljivost površine, vendar ni prispevala k izboljšanju kakovosti lepilnih spojev. Pri bukovini z rdečim srcem je bila ugotovljena višja stopnja loma po lesu, pri čemer pa so bile strižne trdnosti lepilnega spoja nižje. Z uporabo poliuretanskega lepila pri lepljenju bukovine smo v večini primerov dosegli zahteve standarda glede strižne trdnosti lepilnega spoja, vendar pa lepilni spoji niso dosegli zahtev standarda za delaminacijo lepilnih spojev. Raziskava ni pokazala večjih razlik med lepljenjem bukovine brez obarvanj in bukovine z rdečim srcem.

Glavne besede: Konstrukcijsko lepljenje, les, navadna bukev = *Fagus sylvatica*, rdeče srce, plazemska obdelava površine, poliuretansko lepilo

Abstract: The study investigated the effects of plasma surface treatment on bonding beech wood with structural one-component polyurethane adhesive. The wood used included European beech (*Fagus sylvatica* L.) without discolouration and red-heart beech, and the efficiency of the adhesive joints was evaluated by testing shear strength and delamination according to the SIST EN 14080:2013 standard. The results showed that plasma treatment improved the wettability of the surface but did not contribute to enhancing the quality of the adhesive joints. In the case of red-heart beech, a higher degree of wood failure was observed, while the shear strengths of the adhesive joints were lower. Using polyurethane adhesive for bonding beech wood did not meet the standard requirements for adhesive joint delamination. The study did not show significant differences in bonding between beech wood without discolouration and red-heart beech.

Keywords: structural bonding, wood, European beech = *Fagus sylvatica*, red heart, plasma surface treatment, polyurethane adhesive

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Lepljenje lesa je eden ključnih procesov za doseganje polnega potenciala lesa (Ammann, 2015) – tudi kot gradbenega materiala, ki bi pripomogel k zmanjšanju CO₂ izpustov celotnega gradbenega sektorja. V Sloveniji, ki je pogosto predstavljena kot gozdnata dežela, se pričakuje, da bo do leta 2030 vsaka javna zgradba vsebovala vsaj 30 odstotkov

lesa oz. lesnih izdelkov. Ta cilj je del širše strategije za povečanje trajnosti gradbenih praks in zmanjšanje okoljskega vpliva gradbenega sektorja (Uradni list Republike Slovenije, 2017).

V Sloveniji večino lesa, ki se uporablja v gradbene namene, predstavljajo iglavci, predvsem smreka. V zadnjih letih v slovenskih gozdovih narašča delež listavcev in je bukev postala najbolj zastopana drevesna vrsta (Zavod za gozdove Slovenije,

¹ Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva ulica 12, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenija

* e-mail: milan.sernek@bf.uni-lj.si

2024). Tradicionalno uporabljena za energetske namene, pohištvo in galanterijske izdelke, ima zaradi dobrih mehanskih lastnosti velik potencial tudi kot konstrukcijski les, kar se v nekaterih primerih že izkazuje v praksi. Po nemškem tehničnem soglasju (Z-9.1-679, 2018) sta tako smrekov/bukov kot bukov lepljeni lamelirani les (GLT–ang. glued laminated timber) odobrena za uporabo v konstrukcijske namene v okviru razreda uporabnosti 1, skladno z EN 1995-1-1. Ena od možnih in morda bolj smotrnih uporab bukovine pa je njena uporaba za nosilne elemente iz lepljenega furnirja t.i. slojnat furnirni les ali LVL (ang. laminated veneer lumber). Razred uporabnosti 1 predvideva uporabo bukovine le v notranjih oz. pokritih prostorih, kjer se ne pričakuje dlje časa trajajoče visoke relativne zračne vlažnosti. Pogoj je predvsem posledica dimenzijske nestabilnosti bukovine ter posledic, ki jih le-ta prinaša za lepilni spoj. Zaradi dimenzijske nestabilnosti ima namreč bukovina precej višje stopnje delaminacije pri standardnih delaminacijskih testih (EN 14080:2013, aneks C), kar za npr. lepljenje s poliuretanskim lepilom (PUR) pogojuje uporabo vodne raztopine predpremaza pred lepljenjem. Uporaba le-tega podaljša čas priprave lepljencev pred stiskanjem, saj je potrebna njegova aktivacija po nanosu (ca 10 min), potreben čas stiskanja pa je podvojen glede na lepljenje brez predpremaza, kar posledično podaljša in podraži tudi proces same izdelave lepljenca (Bamokina Moanda et al., 2022). V preteklosti je bilo izvedenih že več raziskav na temo obdelave površine, ki bi izboljšala lepljenje bukovine brez uporabe predpremaza. Moanda in sodelavci (2022) so preiskovali vpliv t.i. »mikrostrukture«, ki so jo dosegli z uporabo posebnih skobeljnih nožev, vendar so bili rezultati celo slabši od klasične obdelave površine s skobljanjem. Obširno študijo glede različnih obdelav lesa pred lepljenjem so izvedli tudi Kläusler in sodelavci (2014), le-ta je pokazala, da sta t.i. čelno skobljanje (ang. face milling) in brušenje površine rezultirala v večjem deležu loma po lesu lepilnih spojev. Novejša študija (Hänsel et al., 2023) je pokazala podobne rezultate in potrdila prednosti čelnega skobljanja.

Pojav rdečega srca pri bukvi je dokaj pogost, nastanek le-tega pa je v večini primerov posledica mehanskih poškodb drevesa (npr. odlom veje), kar je v primeru vetrolomov in snegolomov neizbežno (Torelli, 2001). Na območju rdečega srca je zaradi

otiljenja trahej zmanjšana permeabilnost lesa, kar bi lahko vplivalo na kakovost lepljenja. Na površini diskoloriranega lesa je vrednost pH malenkost višja, vendar lahko to pri procesu lepljenja zanemarimo (Schmidt et al., 2012). Na temo lepljenja tovrstnega lesa je bilo narejenih že nekaj raziskav, npr. Aicher (2006), Ohnesorge (2010) in Schmidt (2010). Fašalek (2019) v svojem delu povzema več raziskav na temo lepljenja neobarvane in diskolorirane bukovine, kjer je v splošnem ugotovljeno, da ima rdeče srce lahko vpliv na večjo stopnjo delaminacije lepilnih spojev, vendar se ob ustrezno daljšem času stiskanja le-ta zmanjša, nasprotno pa je več raziskav potrdilo, da pojavnost rdečega srca ne vpliva na rezultate preskusov strižne trdnosti lepilnih spojev.

Glede na omenjene raziskave različnih obdelav površine bi uporaba plazme v primeru izdelave lepljencev lahko predstavljala praktično rešitev za implementacijo v industriji, saj je učinek plazme takojšen (ni aktivacijskega časa), naprava pa bi lahko bila nameščena neposredno v liniji za skobeljnim strojem. Plazma je delno ali popolnoma ioniziran plin, ki vsebuje ione, elektrone, reaktivne spojine, radikale in fotone. Plazmo lahko ustvarimo z napravami preko termalne ali pa elektromagnetne energije (Fridman, 2008; Gurnett & Bhattacharjee, 2005; Tendero et al., 2006). Tvorjeno plazmo lahko delimo na termične in netermične razelektritve. Pri termičnih razelektritvah so elektroni in drugi plinski delci v termodinamskem ravnovesju, kar pomeni, da imajo vsi delci podobno energijsko porazdelitev. Nasprotno pa so pri netermičnih razelektritvah elektroni nosilci večine energije, medtem ko plinski delci ostajajo pri znatno nižjih energijskih nivojih (Fridman, 2008; Kim, 2004; Kogelschatz, 2003; Samal, 2017). Temperatura netermične plazme lahko zaradi temperaturnega neravnovesja ostane na manj kot 10 °C nad sobno temperaturo in je tako primerna za obdelavo bioloških ter drugih toplotno občutljivih materialov (Fridman, 2008; Kogelschatz, 2003; Shin et al., 2022; Weltmann et al., 2010). Lahko se generira pri podtlaku ali pa pri atmosferskem tlaku (ATNP) (Viöl et al., 2012).

V določenih industrijskih panogah je, zaradi obsega obdelovalnih površin, najbolj uporabna ATNP. Uporablja se predvsem za predpripravo površine, kot npr. čiščenje in razmaščevanje. Plazemsko aktiviran plin ima zelo visoko energijo delcev, ki v stiku s površino omogočajo ter pospešujejo kemij-

ske reakcije. Trki z reaktivnimi delci pa povzročijo migracijo atomov, desorpcijo nečistoč, cepitev kemijskih vezi, polimerizacijo, oksidacijo površine itd. (Blanchard et al., 2009). S plazmo tudi aktiviramo površino, zvišamo njeno hidrofilnost ter omogočimo nastanek kisikovih reaktivnih zvrsti, kot so ozon, hidroksidni ion, vodikov peroksid, hidronijev ion in drugi (Klébert et al., 2022; Thanu et al., 2019).

V atmosferskem tlaku poznamo več načinov generiranja ATNP, med katerimi so najpogostejše razelektritve s korono, dielektrična barierna razelektritve (DBD) in plazemski curek (Cvelbar, 2007). Slednji lahko vključuje različne vrste konfiguracij, kar vpliva na močno razlikovanje med fizičnimi in kemijskimi lastnostmi generirane plazme (Penkov et al., 2015). Plazemski curek zaradi svoje oblike premaguje ovire omejenosti v delovnem prostoru (npr. ukrivljenost površine), slabost take konfiguracije pa je omejitev velikosti površine, ki jo lahko obdelamo (posledica velikosti šobe). V tej študiji smo se odločili za uporabo sistema s plazemskim curkom, ki je podoben plazemski razelektritvi drsnega loka, saj se ta najpogosteje uporablja v različnih industrijah (PlasmaTreat OpenAir).

ATNP je zaradi opisanih lastnosti primerna tudi za predobdelavo lesa (Žigon et al., 2018). Plazma ima pozitivne učinke na omočljivost površine in adhezijo premaznih sredstev in lepil na vodni osnovi (Žigon et al., 2019). Plazma očisti površino lesa ter jo oksidira, kar nakazuje povečana tvorba vezi ogljik-kisik, kot so npr. alkoholi in karboksilne skupine, ter zmanjšanje vezi med ogljikom in vodikom v celulozi, hemicelulozi in ligninu. Prav tako zaradi nastanka radikalov in anionov pride do večje polarnosti površine (Avramidis et al., 2009; Král et al., 2015). Učinkovitost plazemske obdelave se vrednoti z merjenjem stičnega kota med tangento na površino kapljice polarne ali nepolarne tekočine s stično površino. To je zanesljiva in enostavna metoda, ki hitro ovrednoti stanje površine obdelovanca po plazemski obdelavi. Določanje stičnega kota je možno tudi z uporabo lepila namesto vode, kar omogoča natančnejše določanje, kako sestava lepila, vključno z viskoznostjo in kemično sestavo, vpliva na stični kot (Shi & Gardner, 2001). Tovrstne meritve bi lahko opravili tudi s PUR lepilom, vendar bi bilo to zahtevnejše. Hkrati pa ima omočitev pri PUR lepilu manjši vpliv na končno trdnost spoja, saj je glavni mehanizem adhezije te vrste lepil kemična

vez. Stični kot je odvisen od proste energije površine ter drugih lastnosti (Gardner et al., 1991).

Predobdelava lesa s plazmo je v prejšnjih študijah pokazala izboljššan oprijem poliuretanskih premazov (npr. Žigon, 2021a; Acda et al., 2012). Za poliuretanska lepila je bilo dokazano, da se po predobdelavi z nizkotlačno (Novák et al., 2015; Safin et al., 2021) in DBD plazmo povečuje oprijem (Žigon et al., 2021b). Izboljššan je tudi oprijem poliuretanskih lepil na plazemsko predobdelanih površinah lesno-plastičnih kompozitov (Nečasová et al., 2019). V nekaterih od teh primerov so bile izboljšave le zanemarljive (Safin et al., 2021). Povod za izvedbo raziskave je bilo pomanjkanje raziskav o vplivu plazemskega curka na kakovost lepilnih spojev s poliuretanskimi lepili.

Cilj raziskave je bil proučiti možnosti izboljšanja kakovosti lepilnih spojev pri lepljenju konstrukcijskih lameliranih izdelkov iz bukovine s poliuretanskimi lepili. Pred lepljenjem trdih listavcev je namreč, za zadostitev določenih zahtev glede kakovosti zlepljenosti, potrebna uporaba vodne raztopine predpremaza, ki podaljša čas in poviša stroške izdelave lepljencev. Standard SIST EN 14080:2013 sicer ne določa obvezne uporabe predpremaza, saj je standard namenjen predvsem za lepljene lamelirane izdelke iz lesa iglavcev in topola, kjer uporaba predpremaza ni potrebna. Čeprav ta standard lahko uporabimo za lepljene lamelirane izdelke iz lesa trdih listavcev, pa ne omogoča označevanja takšnih izdelkov z oznako CE. V raziskavi je bila zato proučena uporaba plazemskega curka, ki izboljša omočljivost površine, kar omogoča takojšnjo pripravo na lepljenje. Tehnologija je primerna tudi za posodobitev obstoječe proizvodnje brez večjih predelav.

2 MATERIALI IN METODE

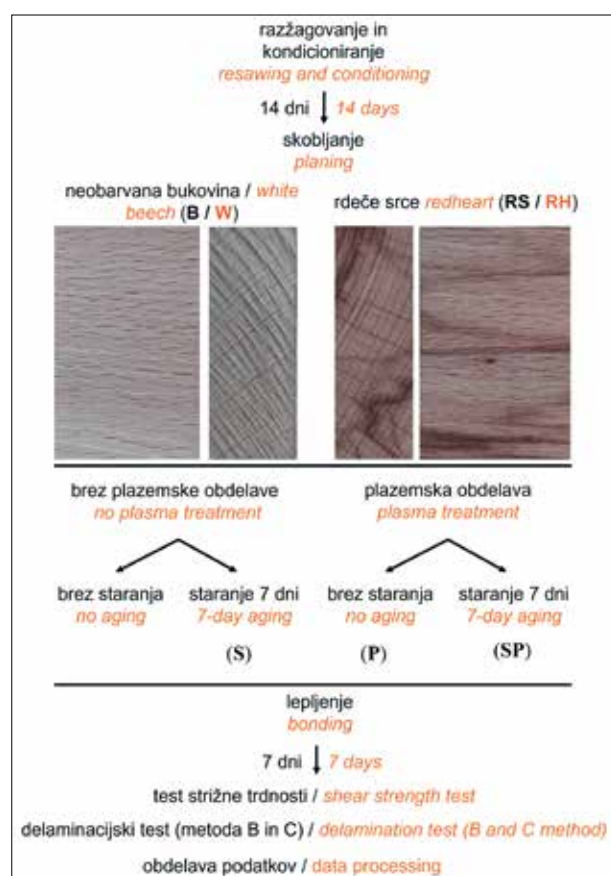
2 MATERIALS AND METHODS

Celoten postopek eksperimenta s ključnimi podarki je predstavljen na sliki 1.

2.1 PRIPRAVA LEPLJENCEV

2.1 PREPARATION OF SAMPLES

Za izdelavo lepljencev smo uporabili les navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.). Iz razpoložljivega materiala smo izbrali deske brez vidnih napak (grče, odklon vlaken, razpoke ipd.) ter razložili tudi med deskami neobarvane bukovine in bukovine z



Slika 1. Shema eksperimenta

Figure 1. Experiment flowchart

rdečim srcem. Za eksperiment smo izbirali deske s tangencialno in polradialno usmeritvijo vlaken na lepljeni površini. Najprej smo deske razžagali na lamele dimenzij 22 mm × 400 mm × 115 mm (debelina × dolžina × širina) nato pa lamele 14 dni kondicionirali v prostoru z normalnimi pogoji ($T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, relativna zračna vlažnost = $65 \pm 5\%$). Dimenzije lamel smo določili na podlagi dimenzij preizkušancev, predpisanih v SIST EN 14080:2013, ki smo jih v nadaljevanju testirali. Po kondicioniranju smo vse lamele obojestransko poskobljali do končne debeline 20 mm, nato pa polovico lamel plazemsko obdelali s plazemskim pramenom, polovica pa jih je ostala neobdelanih ter pripravljenih na lepljenje. Del s plazmo obdelanih in neobdelanih lamel z debelino 20 mm smo pustili v prostoru z normalno klimo ter jih lepili po 7 dneh od mehanske obdelave površin. Lamele smo med seboj ločili, da sta bili obe ploskvi izpostavljeni zraku (ploskve lamel se niso stikale).

Plazemska obdelava je potekala s Plasmareat Openair® enoto v podjetju Rogač Plus d. o. o. (Ore-

hova vas, Slovenija). Za obdelavo lamel smo uporabili šobo RD1004 z nastavkom PTF570/1 z D4 izhodom, in generatorjem tipa FG5001 s parametri 250 V, 12,7 A, 21 kHz in PCT 100 %. Šoba je bila od lamel oddaljena 4 mm, hitrost premikanja šobe preko substrata pa je bila 10 m/min. Obdelane lamele smo zapakirali v aluminijasto folijo, saj smo s tem med prevozom zavarovali plazemsko obdelane površine pred nečistočami in zmanjšali deaktivacijo površine. Vrednotenje stičnega kota smo opravili s prenosnim merilnikom BTH Surface Analyst SA 5001. Merjenje stičnega kota je bilo zgolj informativne narave – za potrditev pravilno nastavljenih parametrov in spremljanja učinkovitosti obdelave. Opravljena je bila po ena meritev na serijo, pri čemer je bila le-ta opravljena na mestu, kjer ni bilo vidnih poškodb, grč ipd.

Dan po plazemski obdelavi smo lamele v stikalnici zlepili s konstrukcijskim enokomponentnim poliuretanskim lepilom (Purbond HB S209, Loctite-Henkel), pri čemer smo upoštevali priporočena navodila proizvajalca lepila in standarda SIST EN 14080:2013. Lamele, ki niso bile plazemsko obdelane, smo lepili takoj po skobljanju. Podatki o karakteristikah lepljenja so podani v preglednici 1. Zlepili smo 12 štirislojnih lepljencev. Te smo 7 dni hranili v prostoru z normalnimi pogoji, nato pa iz njih izžagali preizkušance za strižni in delaminacijski preizkus. Za strižni preizkus smo potrebovali preizkušance dimenzij 100 mm × 48 mm × 48 mm ± 0,5 mm, za delaminacijski preizkus pa 100 mm × 105 mm × 75 mm ± 0,5 mm (debelina × dolžina × širina). Iz vsakega lepljenca smo izdelali po 4 strižne in po 2 delaminacijska preizkušanca.

2.2 TEST STRIŽNE TRDNOSTI

2.2 SHEAR STRENGTH TEST

Testiranje strižne trdnosti lepilnih spojev (opredeljeno v aneksu D standarda SIST EN 14080:2013) je potekalo na računalniško podprtem testirnem stroju Z100 (Zwick/Roell, Ulm, Nemčija). Vsak spoj na izbranih preizkušancih smo obremenili in v programu odčitali silo, potrebno za porušitev spoja ter vizualno ocenili delež loma po lesu na 10 % natančno (0, 10, 20 ... 90, 100 %). Po eksperimentu je sledila statistična analiza pridobljenih podatkov.

Preglednica 1. Parametri lepljenja bukovih lamel s poliuretanskim lepilom.

Table 1. Bonding parameters of beech lamellae with polyurethane adhesive.

Lepilo / Adhesive	1C-PUR, HB S209, Loctite
Ročni nanos lepila / Manual adhesive application quantity	160 g/m ² (enostranski nanos / one side application)
Tlak stiskanja / Press pressure	1 MPa
Pogoji stiskanja / Press conditions	23 °C, 53 % RZV / RH
Čas stiskanja / Pressing time	120 min

2.3 DELAMINACIJA LEPILNIH SPOJEV

2.3 DELAMINATION OF THE ADHESIVE JOINTS

Delaminacijski test smo izvedli v skladu s standardom SIST EN 14080:2013, aneks C. Standard predpisuje tri različne metode/režime impregnacije in sušenja (A, B in C). Pri izvedenem eksperimentu smo uporabili metodi B in C. Vsem metodam je skupna vakuumsko-tlačna impregnacija preizkušancev v vodi, kateri sledi sušenje v sušilni komori.

Preizkušance smo postavili v impregnacijsko komoro ter z distančniki iz HDPE mreže omogočili, da je destilirana voda prišla do vseh površin preizkušancev. Najprej smo vzpostavili podtlak, ki iz celic izsesa zrak in tako omogoči boljši tok vode v lumen celic, nato pa nadtlak, ki omogoči polnjenje celic z vodo. Po impregnaciji smo preizkušance sušili v sušilni komori pri predpisani temperaturi, vlažnosti in hitrosti gibanja zraka. Pri sušenju smo preizkušance razmaknili in čela obrnili vzporedno s tokom zraka ter s tem zagotovili enakomerno sušenje. Ko je masa preizkušancev dosegla 110 % začetne mase, smo izmerili stopnjo delaminacije posameznih spojev. Ocenitev delaminacije smo izvedli neposredno po sušenju na preizkušancih. Pred in po delaminaciji smo preizkušance optično prebrali z namiznim optičnim bralnikom. Po eksperimentu je sledila statistična analiza pridobljenih podatkov.

2.3.1 Delaminacijski test – metoda B

2.3.1 Delamination test – method B

Preizkušance smo stehali in izmerili dolžino spojev, nato pa smo jih potopili v korito z destilirano vodo in ga vstavili v tlačno komoro. Najprej smo preizkušance 30 minut izpostavili podtlaku med 70 in 85 kPa, nato pa vzpostavili nadtlak med 500 in 600 kPa za 2 uri. Po impregnaciji smo preizkušance sušili pri temperaturi zraka 65–75 °C z relativno zračno vlažnostjo 8–10 % in hitrostjo zraka 2,5 m/s, med 10 in 15 ur oziroma tako dolgo, da je njihova masa dosegla 110 % začetne mase.

2.3.2. Delaminacijski test – metoda C

2.3.2 Delamination test – method C

Preizkušance smo stehali in izmerili dolžino spojev, nato pa smo jih potopili v korito z destilirano vodo, ki smo ga vstavili v tlačno komoro. Najprej smo preizkušance 30 minut izpostavili podtlaku med 70 in 85 kPa, nato pa vzpostavili nadtlak med 500 in 600 kPa za 2 uri. Sledil je ponoven cikel podtlaka in nadtlaka. Po impregnaciji smo preizkušance sušili 90 ur pri temperaturi zraka 25–30 °C z relativno zračno vlažnostjo 25–35 % in hitrostjo zraka 2,5 m/s.

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

3 RESULTS AND DISCUSSION

Testirali in med seboj primerjali smo štiri različne metode obdelave površine pred lepljenjem. Obdelave smo primerjali tudi med obema tipoma bukovine. Testirali smo vpliv lepljenja na sveže skobljanem lesu (kontrola), en teden starem skobljanem lesu (staran), plazemsko obdelanem lesu, ki smo ga lepili en dan po obdelavi (plazma) ter en teden po obdelavi s plazmo (starana plazma). Način plazemske obdelave smo izbrali glede na velikost izmerjenega stičnega kota. Preglednica 2 prikazuje stični kot v različnih časovnih intervalih: takoj po plazemski obdelavi, 24 ur ter 7 dni po obdelavi. Kontaktna kote so izmerili v podjetju v različnih časovnih intervalih na referenčnih lamelah. Pred vsakim merjenjem stičnega kota so bile lamele odvijte iz aluminijaste folije (enako kot pred lepljenjem). Opazimo lahko, da je vrednost stičnega kota pred obdelavo višja pri neobarvani bukovini, po obdelavi s plazmo pa sta vrednosti stičnega kota znatno manjši in dokaj podobni. Iz podatkov lahko opazimo postopno poviševanje stičnega kota po enem in sedmih dneh po obdelavi. Nižje vrednosti stičnega kota predstavljajo boljšo omočljivost površine. Predpostavljamo, da se vrednost stičnega kota te-

Preglednica 2. Stični koti (CA) kapljice vode na bukovni lameli pred in po plazemski obdelavi (PO).

Table 2. Contact angle (CA) of water drop on beech lamellae surface before and after plasma treatment (PT).

CA	pred PO / before PT	po PO / after PT	24 ur po PO / 24h after PT	7 dni po PO / 7 days after PT
B / W	71°	25°	38°	45°
RS / RH	52°	29°	35°	49°

stnih lamel spreminja enako kot vrednost stičnega kota na lamelah, ki smo jih imeli shranjene v prostoru z normalnimi pogoji.

Pred merjenjem stičnega kota smo gravimetrično določili vlažnost ter gostoto lesa. Rezultati so prikazani v preglednici 3.

3.1 STRIŽNA TRDNOST LEPILENEGA SPOJA

3.1 SHEAR STRENGTH OF ADHESIVE JOINT

Analiza podatkov testa strižne trdnosti lepilnega spoja je pokazala, da plazemska obdelava ni imela vpliva na kakovost lepljenja. Sprva smo primerjali dosežene strižne trdnosti lepilnih spojev vseh štirih metod predobdelave lamel znotraj tipa bukovine.

Preglednica 3. Povprečna vlažnost in gostota lamel neobarvane bukve (B) in bukovih lamel z rdečim srcem (RS) s standardno napako.

Table 3. Average moisture content and density of normal "white" beech (W) and red heart (RH) beech wood lamellae with standard deviation.

CA	Vlažnost / moisture content [%]	Gostota / density [kg/m ³]
B / W	11,0 ± 0,6	732 ± 45
RS / RH	13,1 ± 0,1	691 ± 10

Rezultati so prikazani v preglednici 4, kjer vidimo, da med povprečnimi strižnimi trdnostmi ni statistično signifikantnih razlik znotraj skupine (tip bukovine), kar je potrdil tudi test enosmerne ANOVA (n = 8–16, P > 0,05).

Sledila je primerjava metod predobdelav po parih, kjer smo primerjali kako predobdelave vplivajo na lepljenje testiranih tipov bukovine. Izvedena statistična analiza za primerjavo parov je bil Studentov t-test. Iz rezultatov v preglednici 4 opazimo, da metoda predobdelave površine nima statistično značilnega vpliva na vrsto bukovine (n = 8–16, P > 0,05). Plazemska obdelava ni pripomogla k boljšemu lepljenju, prav tako tudi en teden star skobljan

Preglednica 4. Rezultati testa strižnih trdnosti s povprečnimi vrednostmi in standardno napako (SE) z dodanimi rezultati enosmerne ANOVA (eA) za metode predobdelave znotraj tipa bukovine, skupnim Studentovim t-testom (Stt sk.) za primerjavo vseh metod znotraj tipa bukovine med neobarvano bukovino (B) in bukovino z rdečim srcem (RS) ter Studentov t-test (Stt) za primerjavo metode predobdelave med tipoma bukovine. (*) P < 0,05

Table 4. Results of the shear strength test with added results of one-way ANOVA (eA) for pre-treatment methods within beech wood type, combined Student's t-test (Stt comb.) for comparison of all methods within beech wood type between white (W) and red heart (RH) beech wood, and Student's t-test (Stt) for comparison of pre-treatment methods between beech wood types. (*) P < 0.05

	Kontrola / control (n= 16)		Plazma / plasma (n= 16)		Staranje / aged (n= 8)		Starana plazma / aged plasma (n= 8)		P (eA)	Post Hoc Tukey test	P (Stt sk.)
	povp./ mean [MPa]	SE [MPa]	povp./ mean [MPa]	SE [MPa]	povp./ mean [MPa]	SE [MPa]	povp./ mean [MPa]	SE [MPa]			
B / W	13,74	0,297	13,40	0,295	13,44	0,528	13,01	0,402	> 0,05	-	0,0067*
RS / RH	12,97	0,285	12,91	0,267	12,51	0,282	12,71	0,209	> 0,05	-	
P (Stt)	> 0,05		> 0,05		> 0,05		> 0,05				

les nima slabših lepilnih sposobnosti od sveže skobljanega lesa.

Večina lepilnih spojev pri vseh načinih predobdelave pri obeh tipih bukovine dosega zadostno strižno trdnost, ki jo narekuje standard SIST EN 14080:2013, kjer je navedeno, da mora povprečna strižna trdnost lepilnih spojev (ob ustreznem odstotku loma po lesu) po enem tednu pri sobnih pogojih dosegati vsaj 6 N/mm² (= 6 MPa). Dobljene vrednosti strižne trdnosti so pričakovano višje, kot v primeru iglavcev, in primerljive z vrednostmi, ki jih je dosegel Pecman (2016) – 13,5 do 13,9 MPa, vendar nižje od vrednosti, ki jih je dosegel Luedtke (2015) – 19,6 do 22,3 MPa. Rezultati strižne trdnosti lepilnega spoja so grafično predstavljeni na sliki 2.

3.2 OCENA LOMA PO LESU PO TESTU STRIŽNE TRDNOSTI

3.2 EVALUATION OF PERCENTAGE OF WOOD FAILURE AFTER SHEAR STRENGTH TEST

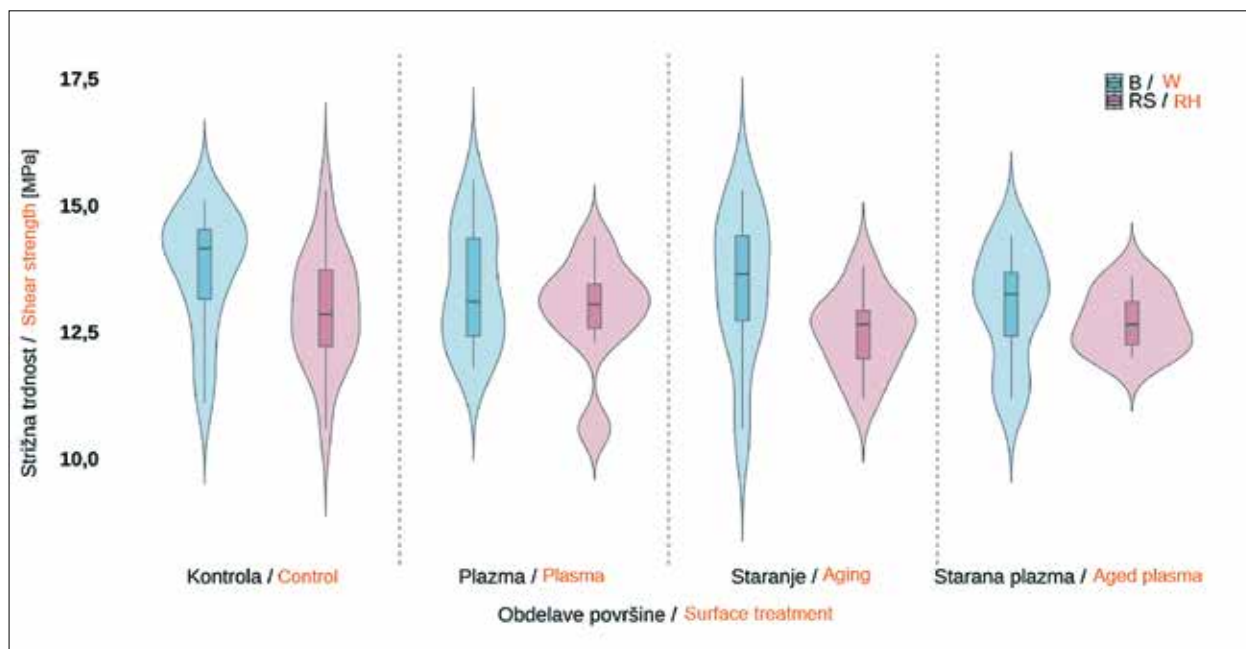
Lom po lesu je bil ocenjen neposredno po strižnem testu spoja. Ocenjevali smo ga vizualno z opazovanjem in zaokroževali na deset procentov natančno. V preglednici 5 so strnjeni rezultati loma po lesu, kjer smo z enosmernim ANOVA testom primerjali metode predobdelave znotraj tipa bukovine.

Opazimo, da znotraj tipa bukovine ni statistično značilne razlike med metodami predobdelave ($n = 8-16$, $P > 0,05$), Studentov t-test vseh metod znotraj tipa bukovine pa je pokazal, da je med njima statistično značilna razlika ($n = 48$, $P = 4.31e^{-9}$). Na podlagi tega lahko zaključimo, da ima bukovina z rdečim srcem višje deleže loma po lesu kot neobarvana bukovina.

Razlike med metodami predobdelave je pokazal tudi parni test med tipoma bukovine, kjer je statistična značilna razlika pri vseh metodah predobdelave.

Če primerjamo strižno trdnost in lom po lesu rdečega srca (slika 3, zgoraj), en rezultat pade pod mejo standarda EN 14080:2013, en pa je mejen, vendar le-ta ustreza predlogu zahtev, ki jih za listavce predlagata Aicher in Ohnesorge (2011). Pri rezultatih neobarvane bukovine (slika 3, spodaj) opazimo, da 9 rezultatov ne pride v okvir zahtev standarda, vendar pa so le-ti na meji predloga zahtev, 10 rezultatov pa je na meji zahtev standarda.

Ugotovili smo, da je odstotek loma po lesu višji pri preizkušancih iz rdečega srca v primerjavi s preizkušanci iz neobarvane bukovine. Nasprotno pa vrednosti strižne trdnosti, ki so manjše za približno 1 MPa, kažejo na to, da je strižna trdnost



Slika 2. Vrednosti strižne trdnosti po skupinah (kontrola, plazemska obdelava, staranje, starana plazma) za neobarvano bukev (B) in rdeče srce (RS).

Figure 2. Shear strength values by groups (control, plasma treatment, aging, aged plasma) for white beech (W) and red heart (RH).

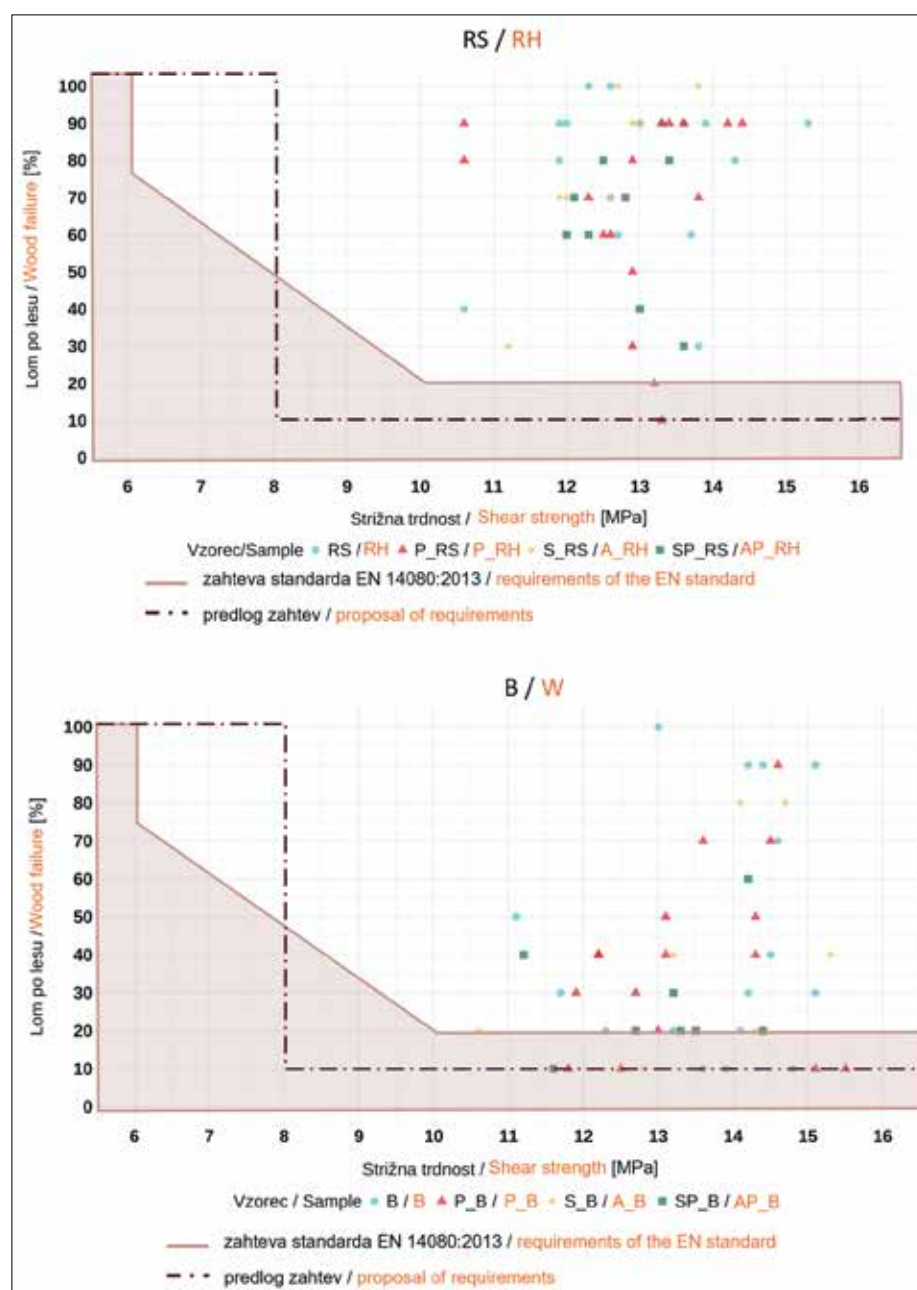
bukovine z rdečim srcem nižja od strižne trdnosti neobarvane bukovine. Slednje bi lahko potrdili ali ovrgli s strižnim preizkusom lesa. V našem primeru bi lahko vzrok za nižjo strižno trdnost iskali v nekoliko višji vlažnosti lesa z rdečim srcem, kar se običajno kaže v nižji tlačni trdnosti lesa (Fu et al., 2021). Vlažnost lesa smo sicer določali iz odrezkov po končnem razžagovanju lamel, kar pomeni, da so lahko bili preizkušanci ob testu že uravnovešeni na enako vlažnost. Razlog za manjše vrednosti strižne trdnosti bi lahko bila tudi nižja gostota lesa rdečega

srca (preglednica 3). Poleg lastnosti lesa pa bi na rezultate lahko vplivala tudi orientiranost lamel.

3.3 DELAMINACIJA LEPILNIH SPOJEV

3.3 DELAMINATION OF ADHESIVE JOINTS

Rezultati delaminacije lepilnih spojev so zbrani v preglednici 6. Najprej smo eksperiment izvedli po metodi B v skladu s standardom EN 14080:2013. Med seboj smo primerjali metode predobdelave znotraj tipa bukovine (preglednica 6). Ugotovili



Slika 3. Soodvisnost posameznih meritev strižne trdnosti in loma po lesu za neobarvano bukovino in rdeče srce, skupaj z okvirjem standarda EN 14080:2013 (polna črta) in predlogom zahtev Aicherja in Ohnesorgeja (črtna črta). B- neobarvana, RS – rdeče srce, P-plazma, S – starana, SP – starana plazma.

Figure 3. Correlation of individual measurements of shear strength and wood fracture for white beechwood and red heartwood, along with the framework of the EN 14080:2013 standard (solid line) and the proposed requirements by Aicher and Ohnesorge (dashed line). B–white, RS–red heartwood, P–plasma, A–aged, AP–aged plasma.

Preglednica 5. Rezultati loma po lesu po strižnem testu z dodanimi rezultati enosmerne ANOVA (eA) za metode predobdelave znotraj tipa bukovine, skupnim Studentovim t-testom (Stt sk.) za primerjavo vseh metod znotraj tipa bukovine med neobarvano (B) in bukovino z rdečim srcem (RS) ter Studentov t-test (Stt) za primerjavo metode predobdelave med tipoma bukovine. (*) $P < 0,05$, (***) $P > 0,001$

Table 5. Results for wood failure in percentage terms after the shear strength test with added results of one-way ANOVA (eA) for pre-treatment methods within the beech wood type, combined Student's t-test (Stt comb.) for comparison of all methods within the beech wood type between white (W) and red heart (RH) beech wood, and Student's t-test (Stt) for comparison of pre-treatment methods between beech wood types. (*) $P < 0.05$, (**) $P > 0.001$

	Kontrola / control (n= 16)		Plazma / plasma (n= 16)		Staranje / aged (n= 8)		Starana plazma / aged plasma (n= 8)		P (eA)	Post Hoc Tukey test	P (Stt sk.)
	povp. / mean [%]	SE [%]	povp./ mean [%]	SE [%]	povp./ mean [%]	SE [%]	povp. / mean [%]	SE [%]			
B / W	44,4	8,2	38,1	6,0	37,5	10,1	27,5	5,6	> 0,05	-	4,31e ⁻⁹ ***
RS / RH	78,1	5,2	66,9	6,7	77,5	8,2	61,3	6,4	> 0,05	-	
P (Stt)	0,0015*		0,0032*		0,0083*		0,0014*				

smo, da med metodami predobdelave pri neobarvani bukovini ni razlik (Kruskal-Wallisov test, $n = 2-4$, $P > 0,05$), pri rdečem srcu pa zaznamo statistično značilno razliko med metodami ($P = 0,036$). Največjo stopnjo delaminacije so imeli preizkušanci, katerih lamele so bile obdelane s plazmo, najmanjšo pa vzorci, pri katerih je med lepljenjem in skobljanjem minil en teden (Post Hoc Dunnov test).

Na podlagi rezultatov iz metode B smo se odločili, da izvedemo tudi metodo C istega standarda. Iz rezultatov v preglednici 6 opazimo, da se ne razlikujejo bistveno od rezultatov metode B. Znotraj metod predobdelave pri neobarvani bukovini ni statistično značilnih razlik, so pa znotraj rdečega srca. Statistična analiza je bila opravljena po Kruskal-Wallisovem testu, pri rdečem srcu pa dodatno še po Post Hoc Dunnovem testu. Dodatno je bil opravljen še t-test, kjer smo med seboj primerjali vrednosti delaminacije po metodi B in C. Statistično značilna razlika ($P = 0,012$) je le za kontrolo neobarvane bukovine, kjer je delaminacija nižja pri metodi C, v primerjavi z metodo B. Drugje test ni pokazal statistično značilne razlike.

Standard SIST EN 14080 predpisuje, da je skupna delaminacija lepilnih spojev za metodo B maksimalno 4 oz. 8 %, za metodo C pa 10 %. Vsi naši preizkušanci so izkazovali bistveno večjo delaminacijo in niso zadostili zahtevam standarda. Razlog

za preveliko delaminacijo bi lahko bila usmeritev vlaken med dvema zlepljenima lamelama (po standardu so to tangencialne lamele) in s tem povezano generiranje visokih napetosti med testom delaminacije. Orientacijo lahko opazujemo na sliki 4, kjer je opazna tudi delaminacija po sušenju. Večina lamel RS je bila bolj radialno orientiranih, kar bi lahko botrovalo k večji stopnji delaminacije. Nekaj lamel pri neobarvani bukovini je bilo povsem tangencialnih (slika 4a), kjer pa opazimo, da imata zgornji in spodnji lepilni spoj precej večjo stopnjo delaminacije kot srednja dva, kljub uporabi tangencialnih lamel. Glede na podatke iz literature (preglednica 7), so stopnje delaminacije v našem primeru večje. V literaturi smo iskali samo rezultate testov, kjer je bilo uporabljeno Purbond lepilo (lepilo proizvajalca Loctite–Henkel).

4 ZAKLJUČEK

4 CONCLUSIONS

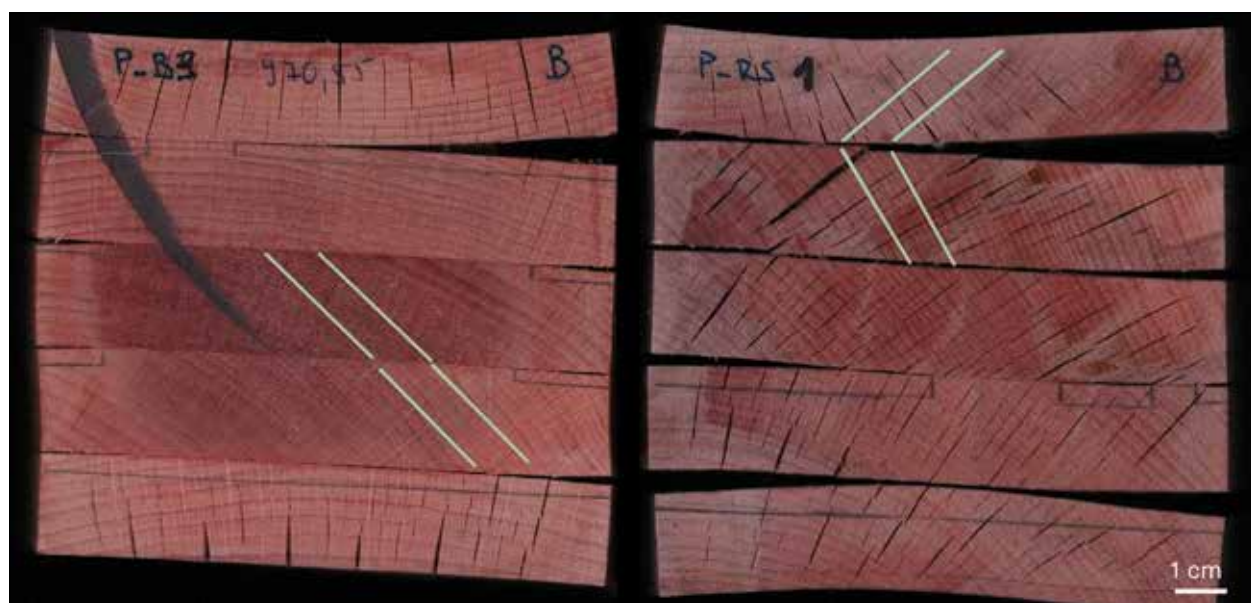
Pri testu strižne trdnosti lepilnih spojev smo pri bukovini z rdečim srcem zaznali večji delež loma po lesu, vendar je bila strižna trdnost teh spojev nižja kot pri neobarvani bukovini.

Obdelava s plazmo je prispevala k znižanju stičnega kota – plazma izboljša omočitev površine, kar

Preglednica 6. Rezultati delaminacije lepilnih spojev po metodi B in C po standardu EN 14080:2013 z dodanimi rezultati Kruskal-Wallisovega testa (KW) za metode predobdelave znotraj tipa bukovine, Post Hoc Dunnovega testa za podatke, kjer je $P < 0,05$, ter Studentovega t-testa (Stt) za primerjavo metode predobdelave med tipoma bukovine (B – dela, RS – rdeče srce). (*) $P < 0,05$

Table 6. Results of the delamination of adhesive joints according to Methods B and C of the EN 14080:2013 standard, with additional results from the Kruskal-Wallis test (KW) for pre-treatment methods within the beech wood type, post-hoc Dunn's test for data where $P < 0.05$, and Student's t-test (Stt) for comparing the pre-treatment method between the beech wood types (W – white beech, RH – red heart beech). (*) $P < 0.05$

	Kontrola / control (n= 4)		Plazma / plasma (n= 4)		Staranje / aged (n= 2)		Starana plazma / aged plasma (n= 2)		P (KW)	Post Hoc Dunn test
Met. B	povp./ mean [%]	SE [%]	povp./ mean [%]	SE [%]	povp./ mean [%]	SE [%]	povp./ mean [%]	SE [%]		
B / W	88,6	5,58	91,3	7,24	71,2	8,99	79,7	7,63	> 0,05	-
RS / RH	57,9	5,59	87,94	3,31	47,65	6,46	86,7	1,42	0,036*	$P \geq SP \geq K > S$
P (Stt)	> 0,05		> 0,05		> 0,05		> 0,05			
Met. C	povp./ mean [%]	SE [%]	povp./ mean [%]	SE [%]	povp./ mean [%]	SE [%]	povp./ mean [%]	SE [%]		
B / W	82,1	3,79	84,1	4,65	50,3	5,96	91,7	2,54	> 0,05	-
RS / RH	77,1	3,30	95,1	1,57	73,1	2,59	91,7	0,35	0,028*	$P \geq SP \geq K > S$
P (Stt)	> 0,05		> 0,05		> 0,05		> 0,05			



Slika 4. Preizkušanca po delaminacijskem testu z vidnim potekom branik (zelene črte).

Figure 4. Test specimen after the delamination test. Green lines indicate the direction of the growth rings.

Preglednica 7. Delaminacija lepilnih spojev bukovih nosilcev, lepljenih s Purbond lepili brez uporabe predpremaža.

Table 7. Delamination of adhesive joints in beech joints bonded with Purbond adhesive without the use of a primer.

Avtor, uporabljeno lepilo / Author, adhesive used	Delaminacija / delamination (%)
(Luedtke et al., 2015), HB S109	metoda B normalen čas stiskanja: 62, 66 podvojen čas stiskanja: 40, 50
(Bamokina Moanda et al., 2022), HB S109	metoda B med 30 in 50 za skobljano površino, nad 60 za mikrostrukturirano površino
(Pecman et al., 2016), HB S209	metoda A:71, metoda B:62, metoda C:52

pa ni imelo vpliva na kvalitetnejše lepljenje s PUR lepilom.

Enotedensko staranje lepilne površine ni negativno vplivalo na rezultate strižnega preizkusa. Starana površina je imela nepričakovano boljše rezultate delaminacije. Upoštevati je potrebno, da smo za delaminacijo uporabili le 2 preizkušanca starane površine in je zato rezultat v okviru statistične variabilnosti lastnosti lesa.

Stopnje delaminacije po postopkih B in C se le malenkost razlikujejo, po obeh metodah pa ne dosegamo vrednosti, ki jih določa standard SIST EN 14080:2013.

Glede na to, da je uporaba plazme dokazano koristna v aplikacijah, kjer se uporabljajo vodotopni premazi ter lepila, ki vsebujejo vodo, bi bilo smiselno izvesti podoben eksperiment s konstrukcijskim melamin-urea-formaldehidnim (MUF) lepilom, kjer bi imela boljša omočitev verjetno večji vpliv na kakovost lepljenja.

5 POVZETEK

5 SUMMARY

This study explores the effects of plasma surface treatment on the bonding of European beech (*Fagus sylvatica*) wood with structural one-component polyurethane (PUR) adhesive. A focus is placed on two types of beech: non-discoloured beech and red-heart beech, the latter known for its distinct

colouration in the central part of a stem. The research aimed to assess the effectiveness of plasma treatment on these woods, with shear strength and delamination tests performed in accordance with the related standards. The use of wood as a construction material is increasingly favoured due to its potential to reduce CO₂ emissions. In Slovenia, beech has become the predominant tree species in forests, though Norway spruce (*Picea abies*) is commonly used in construction nowadays. While beech is often used for furniture and energy purposes, its mechanical properties suggest it has potential as a structural material. However, beech's tendency to swell and shrink with changes in moisture more than the commonly used spruce creates challenges for adhesive bonding, often resulting in higher delamination, particularly when polyurethane adhesives are applied. Plasma treatment is considered a possible solution, offering immediate surface activation without the delays associated with traditional priming processes. Lamellae of non-discoloured and discoloured beech wood were conditioned, planed and then treated with a plasma jet system in the study. Plasma treatment is recognized as enhancing the surface properties of materials, including wood, by increasing wettability — a critical factor for effective bonding. Following plasma treatment, the lamellae were bonded with PUR adhesive, and the adhesive joints were tested for shear strength and resistance to delamination. Additionally, the effects of surface aging were explored by bonding some lamellae one week after treatment. The results indicated that while the plasma treatment improved the wettability of the wood surfaces, as evidenced by a reduced contact angle of water droplets, this improvement did not result in better bonding performance with PUR adhesive. Shear strength tests showed no significant enhancement in the adhesive joints, regardless of whether the wood had undergone plasma treatment. Interestingly, a higher wood failure percentage was demonstrated by red-heart beech in shear tests, but with lower overall shear strengths compared to common beech. The aging of treated surfaces for a week did not negatively affect shear strength, suggesting that plasma treatment's effects on surface chemistry are relatively stable over short periods. Delamination testing revealed that none of the samples met the standard

requirements, which specify maximum allowable delamination rates for adhesively bonded wood joints. Particularly high delamination rates were observed in plasma-treated samples of red-heart beech, even exceeding those of untreated samples in some instances. This suggests that while plasma treatment can modify surface properties to make them more receptive to adhesives, it does not necessarily guarantee improved long-term bonding performance, especially with PUR adhesives. Increased moisture content likely contributed to the lower shear strength observed in red-heart beech joints, underscoring the need for longer conditioning prior to adhesive bonding processes. The study's results indicate that although plasma treatment is beneficial for increasing wettability, it may not sufficiently address the bonding challenges associated with beech wood when using PUR adhesives. Ultimately, it is suggested by the research that exploring alternative adhesives, such as melamine-urea-formaldehyde (MUF), might yield better results, since these water containing adhesives could potentially benefit more from the improved surface wettability provided by plasma treatment. Additionally, the orientation of wood grain appears to influence delamination outcomes, as variations in lamella alignment could affect stress distribution and failure modes during testing. The nuanced interactions between wood surface treatments and adhesives are underscored by this study, emphasizing the importance of tailored bonding strategies to suit the specific properties of wood species like beech. Future work should aim to refine plasma treatment protocols and test different adhesive formulations, potentially paving the way to achieving durable and reliable bonds in beech wood applications, especially in structural uses where adhesive performance is critical. Understanding these dynamics will be essential in advancing the use of wood as a sustainable construction material, in line with broader environmental goals.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENT

Raziskavo je finančno podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS), v okviru programov P4-0015, P2-0273 in P4-0430, kot tudi raziskovalnega

projekta N2-0280. Prav tako se avtorji zahvaljujejo za finančno podporo Nacionalnega znanstvenega centra Poljske v okviru razpisa OPUS v programu Weave, št. 2021/43/I/ST8/00554. Posebna zahvala gre podjetju Rogač Plus d.o.o., ki nam je omogočilo uporabo njihove plazemske naprave za obdelavo materiala.

VIRI

REFERENCES

- Aicher, S., & Reinhardt, H. W. (2006). Delaminierungseigenschaften und Scherfestigkeiten von verlebten rotkernigen Buchenholzlamellen. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 65(2), 125–136. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-006-0114-7>
- Aicher, S., & Ohnesorge, D. (2011). Shear strength of glued laminated timber made from European beech timber. *European Journal of Wood and Wood Products*, 69(1), Article 1. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-009-0399-9>
- Acda, M. N., Devera, E. E., Cabangon, R. J., & Ramos, H. J. (2012). Effects of plasma modification on adhesion properties of wood. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 32, 70–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.10.003>
- Ammann, S. D. (2015). Mechanical performance of glue joints in structural hardwood elements (p. 1 Band) [ETH Zurich; Application/pdf]. DOI: <https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-010575524>
- Avramidis, G., Hauswald, E., Lyapin, A., Militz, H., Viöl, W., & Wolkenhauer, A. (2009). Plasma treatment of wood and wood-based materials to generate hydrophilic or hydrophobic surface characteristics. *Wood Material Science and Engineering*, 4(1–2), 52–60. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480270903281642>
- Bamokina Moanda, D., Lehmann, M., & Niemz, P. (2022). Investigation of the impact of micro-structuring on the bonding performance of beechwood (*Fagus sylvatica* L.). *Forests*, 13(1), 113. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13010113>
- Nečasová, B., Liška, P., Kelar, J., & Šlanhof J. (2019). Comparison of adhesive properties of polyurethane adhesive system and wood-plastic composites with different polymers after mechanical, chemical and physical surface treatment. *Polymers*, 11(3), 397. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11030397>
- Blanchard, V., Blanchet, P., & Riedl, B. (2009). Surface energy modification by radiofrequency inductive and capacitive plasmas at low pressures on sugar maple: An exploratory study. *Wood and Fiber Science*, 41.
- Cvelbar, U. (2007). Osnove fizike kisikove plazme. *Vakuumist*, 1/2, 24–33. URL: <https://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:doc-2L3S7ZLD>
- Čufar, K., Gorišek, Ž., Merela, M., Kropivšek, J., Gornik Bučar, D., & Straže, A. (2017). Lastnosti bukovine in njena raba—Properties of beechwood and its use. *Les/Wood*, 66(1), 27–39. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2017.v66n01a03>

- Fašalek, A. (2019). Optimizacija sestave hibridnih lepljenih lameliranih nosilcev [Magistrsko delo, A. Fašalek]. Repozitorij Univerze v Ljubljani. URL: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=113416> (15.10.2024)
- Fridman, A. (2008). Plasma chemistry. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511546075>
- Fu, W.-L., Guan, H.-Y., & Kei, S. (2021). Effects of moisture content and grain direction on the elastic properties of beech wood based on experiment and finite element method. *Forests*, 12(5), 610. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12050610>
- Gardner, D. J., Generalla, N. C., Gunnells, D. W., & Wolcott, M. P. (1991). Dynamic wettability of wood. *Langmuir*, 7(11), 2498–2502. DOI: <https://doi.org/10.1021/la00059a017>
- Gurnett, D. A., & Bhattacharjee, A. (2005). Introduction to Plasma Physics: With Space and Laboratory Applications. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511809125>
- Hänsel, A., Tröger, J., Rößler, M., Brachhold, N., & Niemz, P. (2023). Influence of surface treatment on the bonding quality of wood for load-bearing purposes. *Wood Material Science & Engineering*, 18(6), 2128–2139. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2269138>
- Kim, H.-H. (2004). Nonthermal plasma processing for air-pollution control: a historical review, current issues, and future prospects. *Plasma Processes and Polymers*, 1(2), 91–110. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppap.200400028>
- Kläusler, O., Hass, P., Amen, C., Schlegel, S., & Niemz, P. (2014). Improvement of tensile shear strength and wood failure percentage of 1C PUR bonded wooden joints at wet stage by means of DMF priming. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72(3), 343–354. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0786-8>
- Klébert, S., Mohai, M., & Csiszár, E. (2022). Can plasma surface treatment replace traditional wood modification methods? *Coatings*, 12(4), 487. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12040487>
- Kogelschatz, U. (2003). Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 23, 1–46. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1022470901385>
- Král, P., Ráhel', J., Stupavská, M., Šrajcar, J., Klímek, P., Mishra, P. K., & Wimmer, R. (2015). XPS depth profile of plasma-activated surface of beech wood (*Fagus sylvatica*) and its impact on polyvinyl acetate tensile shear bond strength. *Wood Science and Technology*, 49(2), 319–330. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0691-7>
- Letno poročilo Zavoda za gozdove. Zavod za gozdove Slovenije. URL: http://www.zgs.si/zavod/publikacije/letna_porocila/index.html. Dostopano (12. 9. 2024)
- Luedtke, J., Amen, C., Van Ofen, A., & Lehringer, C. (2015). 1C-PUR-bonded hardwoods for engineered wood products: Influence of selected processing parameters. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73(2), 167–178. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0875-8>
- Ohnesorge, D., Richter, K., & Becker, G. (2010). Influence of wood properties and bonding parameters on bond durability of European Beech (*Fagus sylvatica* L.) glulams. *Annals of Forest Science*, 67(6), 601. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest/2010014>
- Pecman, K. (2016). Lepljen lameliran les iz bukovine: diplomsko delo – visokošolski strokovni študij [Diplomsko delo, K. Pecman]. Repozitorij Univerze v Ljubljani. URL: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=158794> (15.10.2024)
- Penkov, O. V., Khadem, M., Lim, W.-S., & Kim, D.-E. (2015). A review of recent applications of atmospheric pressure plasma jets for materials processing. *Journal of Coatings Technology and Research*, 12(2), 225–235. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11998-014-9638-z>
- Rushanovich Safin, R., Khasanshin, R., Galyavetdinov, N., Salimgaraeva, R., Mukhametzyanov, S., Safina, A., & Kraysman, N. (2021). Improving the physical and mechanical performance of laminated wooden structures by low-temperature plasma treatment. *Polymers*, 13(2), 252. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13020252>
- Samani, R., & Molaei, H. (2019). Enhancement of bonding performance of wood surface using atmospheric pressure plasma treatment. *Surface and Coatings Technology*, 361, 25–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.11.026>
- Sarrazin, B., & Verchère, A. (2007). Advanced technology for surface treatment of wood. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(5), 1130–1137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.05.007>
- Schmidt, M., Glos, P., & Wegener, G. (2010). Verklebung von Buchenholz für tragende Holzbauteile. *European Journal of Wood and Wood Products*, 68(1), 43–57. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-009-0387-1>
- Schmidt, M., Thönnißen, A., Knorz, M., Windeisen, E., & Wegener, G. (2012). Relevant wood characteristics for gluing beech and ash with regard to discoloration. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70: 319–325
- Shi, S. Q., & Gardner, D. J. (2001). Dynamic adhesive wettability of wood. *Wood and Fiber Science*, 33(1), 58–68. URL: <https://www.researchgate.net/publication/265550144>
- SIST EN 14080:2013. Lesene konstrukcije – Lepljeni lamelirani les in lepljeni masivni les.
- Škerjanc, M., & Omerzel, D. (2015). Determining the effect of plasma treatment on wood surface characteristics and their influence on adhesive bonding. *Wood Research*, 60(4), 635–646.
- Stecher, S. J., & Heyne, S. (2021). Influence of atmospheric pressure plasma on wood wettability and bonding quality. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79(4), 977–985. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01762-5>
- Torelli, N. (2001). Odziv drevja na globoke in površinske poškodbe na primeru bukve (*Fagus sylvatica* L.) s poudarkom na nastanku in ekologiji ranitvenega lesa ("rdeče srce") (pregled). *Gozdarski vestnik* 59, 2: 85–95.
- Tulliani, J.-M., & Malucelli, G. (2009). The effects of the micro-structure of wood on bonding performance. *Wood and Fiber Science*, 41(3), 293–303.

- Uradni list Republike Slovenije (2017). Uredba o zelenem javnem naročanju. Uradni list Republike Slovenije, št. 51/17. URL: <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=URED7202> (21.10.2024)
- Varga, M., & Török, M. (2022). Effect of atmospheric pressure plasma treatment on the adhesive bonding of wood and wood-based materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 114, 102531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.102531>
- Vilar, E., & Guedes, J. P. (2019). Effects of low-temperature plasma treatment on the wettability of wood surfaces. *Applied Sciences*, 9(1), 114. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9010114>
- Wöhler, M., & Möhring, J. (2019). Ageing of atmospheric pressure plasma treated wood surfaces: Impact on adhesion performance. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 95, 102391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102391>
- Ziegler, A., Omerzel, D., & Koller, M. (2021). Investigating the effects of atmospheric pressure plasma treatment on wood surface energy and adhesive bonding performance. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 35(16), 1745–1764. DOI: <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1800546>
- Žigon, J. (2021a). Interactions of a waterborne coating with plasma pre-treated densified beech wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79, 1383–1394. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01716-z>
- Žigon, J., Saražin, J., Šernek, M., Kovač, J., & Dahle, S. (2021b). The effect of ageing on bonding performance of plasma treated beech wood with urea-formaldehyde adhesive. *Cellulose*, 28, 2461–2478. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03687-z>
- Žigon, J., Petrič, M., & Dahle, S. (2018). Dielectric barrier discharge (DBD) plasma pretreatment of lignocellulosic materials in air at atmospheric pressure for their improved wettability: a literature review. *Holzforschung*, 72(11), 979–991. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2017-0207>