



OBDELAVA POVRŠIN LESA Z DCSBD PLAZMO PRED NANOSOM PREMAZOV

DCSBD PLASMA TREATMENT OF WOOD SURFACES BEFORE COATING APPLICATION

Neja Bizjak Štrus^{1*}, Zlata Kelar Tučeková², Dávid Brodňanský³, Sebastian Dahle¹

UDK članka: 630*829.1:52-726

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 16.2.2026

Sprejeto / Accepted: 11.6.2026

Izvleček / Abstract

Izvleček: Ustrezna zaščita lesa je ključna za podaljšanje njegove življenjske dobe, še posebej, kadar je uporabljen v izdelkih z visoko dodano vrednostjo, kot so jadrnice in druga plovila. Pred nanosom je priporočljivo, da se tak les očisti, običajno s pomočjo naravnih ali sintetičnih topil. Ena od alternativnih metod odstranjevanja nečistoč je uporaba netermične plazme, kot npr. plazma difuzne koplanarne površinske barijerne razelektritve (DCSBD). Za preverjanje njene učinkovitosti smo pred nanosom dveh vrst premazov za čolne očistili kose lesa navadne bukve, navadne smreke in beljave rdečega bora s pomočjo plazme, terpentina in topila na osnovi nafte. Vzorce smo nato izpostavili naravnim pogojem za eno leto, na vsake tri mesece smo merili barvo in sijaj, da bi ocenili lastnosti premaza in vpliv načina čiščenja površine na obstojnost testiranih premazov. Rezultati so pokazali, da metoda čiščenja pred nanosom premaza ni vplivala na obstojnost ali vizualne lastnosti končnega premaza. DCSBD plazma bi torej lahko služila kot okolju prijazna alternativa za predhodno obdelavo lesa.

Ključne besede: DCSBD plazma, premazi za les, čiščenje površin, naravno staranje

Abstract: Proper protection is crucial for extending the lifespan of wood, especially in demanding applications such as boat building. It is advisable to clean the surface of wood before applying a coating, typically using either natural or synthetic solvents. One alternative for removing impurities from wood surfaces is the use of nonthermal plasma, such as with the diffuse coplanar surface barrier discharge (DCSBD) method. To test the effectiveness of this approach, boards made from European beech, Scots pine sapwood, and Norway spruce were cleaned with plasma, turpentine and a petroleum-based solvent before applying two types of boat coatings. The samples were then exposed to natural conditions for one year. During this time, colour and gloss were measured every three months to assess the coating properties and the impact of the surface cleaning method on the durability of the tested coatings. The results indicated that the surface cleaning method used before coating did not impact the durability or visual properties of the selected coating. DCSBD plasma could therefore be used as an environmentally friendly alternative to wood pretreatment.

Keywords: DCSBD plasma, wood coatings, cleaning of surfaces, natural weathering

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Les se pogosto uporablja v zunanjih okoljih, kjer je lahko v neposrednem stiku z vodo ali tlemi. V takih pogojih je izpostavljen različnim neugodnim biotskim in abiotskim dejavnikom, ki lahko sčasoma vplivajo na njegovo funkcionalnost ter estetski

videz (Brischke et al., 2017). Je vsestranski material, ki se uporablja na številnih področjih, med drugim tudi pri gradnji plovil. Posebno mesto ima pri izdelavi plovil z visoko dodano vrednostjo, kot so jahte, kjer se od konstrukcije pričakuje robustnost in dolga življenjska doba. Zaradi visoke investicije uporabniki zahtevajo kakovostno izvedbo, ki zagotavlja

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Masaryk University, Faculty of Science, Department of Plasma Physics and Technology, CEPLANT—R&D Centre for Plasma and Nanotechnology Surface Modifications, Kotlářská 267/2, 602 00 Brno, Czech Republic

* e-pošta: neja.bizjak.strus@bf.uni-lj.si

trajnost in zanesljivost v zahtevnih pogojih. Pri tem je zelo pomemben videz plovila kot tudi ohranjanje ekodizajna skozi svojo življenjsko dobo. Lesena plovila imajo tudi nižjo maso v primerjavi s kovinskimi materiali in kompoziti, ki se uporabljajo za gradnjo plovil, kar pripomore k manjši porabi goriva in s tem znižuje negativni vpliv na okolje. Dolga leta so plovila gradili izključno iz lesa iz lokalnega okolja, danes pa se les za izdelavo v jahtah in podobnih plovilih uporablja veliko manj. Glavna težava je težje oblikovanje lesa in prilagajanje različnim zahtevnejšim oblikam (Pommier et al., 2016). Za palube so pogosto uporabljali tropske listavce zaradi njihove odpornosti proti razkroju, medtem ko so bili listavci kot je hrast, manj priljubljeni (Hillman, 1956). Uporaba tropskih lesnih vrst močno vpliva na krčenje gozdov, kar ima negativen vpliv na okolje in podnebne spremembe (Leon et al., 2022). Danes se znova vračajo k lokalnim lesnim vrstam za izdelavo plovil, saj te zagotavljajo trajnost (Pommier et al., 2016). Da bi zaščitili les, ki je pogosto izpostavljen zunanjim dejavnikom, je pomembno, da ga zaščitimo s premazi z odličnimi lastnostmi (Khademibami & Bobadilha, 2022).

Zaščita lesa temelji na dveh glavnih pristopih, kemični zaščiti in modifikaciji lesa. Kemična zaščita je učinkovita, vendar pogosto toksična, zato je podvržena regulativnim omejitvam, še posebej ko gre za izdelke, ki so v stiku s tlemi in vodo. Tehnologije modifikacije lesa se globalno širijo, vendar se uvajajo postopno, predvsem zaradi visokih stroškov, omejenih uporabniških izkušenj in skepticizma potrošnikov. Dodatno zaščito ustvarimo tudi s premazi, katerih glavni namen je zagotavljanje odpornosti proti vremenskim vplivom (Khademibami & Bobadilha, 2022). Učinkovitost površinske obdelave pri zaščiti lesa je v veliki meri odvisna od njene prekrivnosti in sposobnosti adhezije na leseno površino. Visokokakovostni premazi morajo odbijati vodo, ne da bi jo zadrževali v lesu, saj bi s tem omogočili pogoje za razvoj mikroorganizmov (Pandit et al., 2020). Na obstojnost premazov lahko vplivamo tudi s predobdelavo površine lesa. Za lokalno rastoče lesne vrste je površinska zaščita s primernim premaznim sistemom ključnega pomena za uporabo v tako zahtevnih aplikacijah, kot so npr. palube (Humar et al., 2019). Za te aplikacije se pogosto uporablja premaze na osnovi epoksi ali akrilnih polimerov (Bulian & Graystone, 2009).

Ključni korak za zagotavljanje visoke trajnosti in učinkovitosti premazov je ustrezna priprava lesene površine v skladu z navodili proizvajalcev, saj s tem preprečimo zgodnje odstopanje in druge poškodbe premaza (Weldon, 2009). Več proizvajalcev premazov za ladijske palube zahteva »razmaščevanje«, tj. čiščenje površine z alkoholnimi ali nitro topili (topila na osnovi nafte) – običajno je to predpisano za lesne vrste z visoko vsebnostjo smole (Allen, 2006), nekateri proizvajalci pa priporočajo razmaščevanje oz. čiščenje za vse površine, ne glede na vrsto lesa.

Kot možna alternativa za čiščenje je netermična plazma, predvsem plazma, ki deluje pri atmosferskem tlaku in uporablja zrak kot delovni plin (Klingner et al., 2013). Plazemska obdelava lesa je učinkovita pri čiščenju površine, saj z jedkanjem odstrani nečistoče, kar pripomore k boljši adheziji kot tudi enakomerno nanesenemu premazu (Tu et al., 2023; Žigon et al., 2018). Ena od vrst netermične plazme je difuzna koplanarna površinska barierna razelektritev (DCSBD plazma), ki je primerna predvsem za predobdelavo ravnih površin in ni odvisna od debeline obdelovanca. Z DCSBD plazmo lahko ustvarimo tanko plast makroskopsko enakomerne plazme z visoko gostoto, kar omogoča homogeno obdelavo lesa pri atmosferskem tlaku (Černák et al., 2009). Prav tako je bila ta plazma uspešno uporabljena za predobdelavo lesa različnih vrst, kot so dob (*Quercus robur*), navadna smreka (*Picea abies*), navadna bukev (*Fagus sylvatica*) in veliki jesen (*Fraxinus excelsior*) (Lux et al., 2013; Odrášková et al., 2008).

Z našo raziskavo bi radi razširili ugotovitve dveh predhodnih študij, kjer smo analizirali vpliv čiščenja podlage z različnimi sredstvi na učinkovitost epoksidnih in alkidnih premazov ob umetnem staranju ter ocenili stroškovne in okoljske posledice njihove uporabe (Bizjak Štrus et al., 2025; Bizjak Štrus et al., 2026). Nekateri proizvajalci premazov predpisujejo čiščenje z razredčilom ne glede na vrsto podlage, medtem ko ga drugi priporočajo predvsem pri lakiranju eksotičnih vrst lesa z večjo vsebnostjo smol. V raziskavi smo preučili učinek čiščenja pred nanosom premaza pri treh lokalnih vrstah lesa ter ocenili vpliv tega postopka na obstojnost premaza po enoletni zunanji izpostavitvi vzorcev.

2 MATERIALI IN METODE

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 ČIŠČENJE POVRŠIN LESA

2.1 CLEANING WOOD SURFACES

Za eksperiment smo pripravili vzorce lesa navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.), navadne smreke (*Picea abies* (L.) Karst.) in beljave rdečega bora (*Pinus sylvestris* L.). Vzorci so bili dimenzij 370×80×20 mm³ z radialno orientacijo vlaken. Površina vzorcev je bila skobljana, vzorci pa kondicionirani na sobne pogoje (20 °C, 65 % relativne zračne vlage). Vlažnost vzorcev je bila med 10 in 12 %. Vzorce smo očistili z DCSBD plazmo, terpentinom (Terpentinovo olje, Chemcolor Sevnica d.o.o., Blanca, Slovenia), ali pa komercialno dostopnim topilom na osnovi nafte (AMAL 1030 razredčilo, AMAL d.o.o., Ljubljana, Slovenia) (AMAL1030). Terpentin in AMAL 1030 smo na površino nanесли s pomočjo papirnatih brisačk. Pogoje DCSBD plazme smo optimizirali glede na izmerjen stični kot vode z namenom izboljšanja njene učinkovitosti. Pri tem smo prilagodili čas obdelave s plazmo ter razdaljo elektrode od površine vzorca. Po optimizaciji so bili vzorci obdelani 10 s pri vhodni moči 400 W in razdalji 0,5 mm od DCSBD plazemske enote, kar omogoča delovanje plazme na celotni površini ne glede na manjše deformacije vzorcev (npr. ukrivljanje), hkrati pa upošteva tudi že objavljene podatke (Talviste et al., 2019).

2.2 DCSBD PLAZMA

2.2 DCSBD PLASMA

Sistem DCSBD plazma je sestavljen iz vzporednih srebrovih elektrod, vgrajenih v keramiko aluminijevega oksida z uporabo večslojnih laminacijskih tehnik, ki je podrobno opisana v članku (Černák et al., 2009). Uporabili smo tovrstno elektrodo, ki je po konstrukciji in velikosti podobna komercialnemu sistemu RPS250+ (Roplass s.r.o., Češka republika). Drugače kot pri komercialnem sistemu smo napravo uporabili z napajalnikom (Bizjak Štrus et al., 2026), ki zagotavlja visokofrekvenčno visoko napetost s približno 15 kHz, pri čemer najvišja napetost dosega 10–20 kV. Takšna konfiguracija omogoča makroskopsko homogeno plazmo v zraku pri atmosferskem tlaku. Nastala plast plazme ima ocenjeno efektivno debelino približno 0,3 mm, ki je odvisna od pogojev generiranja kot sta sestava plina ali vhodna moč (Šimor et al., 2002). V naših poskusih smo zaradi možne neenakomerne površi-

ne lesa uporabili razdaljo 0,5 mm med leseno površino in keramično površino. Učinek plazme pri tej razdalji je bil predhodno preizkušen in ocenjen kot zadovoljiv. Izguba mase, določena s tehtanjem pred čiščenjem in po njem, je znašala 0,2 % ali manj na vzorec, kar smo ocenili kot zanemarljivo.

2.3 STIČNI KOT VODE (WCA)

2.3 WATER CONTACT ANGLE (WCA)

Za merjenje stičnega kota vode (WCA) na očiščenih površinah smo uporabili optični goniometer (Surface Energy Evaluation System, Advex Instruments, Czech Republic), WCA pa je bil nato izračunan z Young-Laplace analizo z uporabo programske opreme (Mantanis & Young, 1997). WCA smo izmerili na manjših kosih lesa. Skupno smo analizirali do 13 kapljic na posamezen parameter, vsako kapljico smo merili 63 s (1,9 zajemov slik na sekundo). Merjenje WCA smo izvedli takoj po uporabljeni metodi čiščenja. Rezultati WCA so na voljo v članku, kjer so izvedli podoben eksperiment na manjših vzorcih, ki so jih nato umetno starali 240 ur (Bizjak Štrus et al., 2026).

2.4 PREMAZI ZA LES

2.4 WOOD COATINGS

Po čiščenju lesa smo ga premazali z dvema vrstama premazov. Vzorce, ki smo jih očistili z AMAL 1030, in eno tretjino plazemsko očiščenih vzorcev smo v dveh slojih premazali s premazom na alkidni osnovi (Lak za čolne, AMAL d.o.o., Ljubljana, Slovenia) (AMAL). Polovico vzorcev, ki smo jih očistili s terpentinom, in tretjino plazemsko obdelanih vzorcev smo premazali s temeljnim premazom na osnovi epoksidne smole (Curing agent 95360 and light primer 45559, HEMPEL d.o.o., Umag, 134 Croatia) ter z dvema plastema premaza proti obraščanju (Hard Racing white 76300, HEMPEL d.o.o., Umag, 135 Croatia) (HR). Preostanek vzorcev smo premazali le z dvema plastema HR premaza (brez temeljnega premaza). Premaze smo nanесли na površino lesa po navodilih proizvajalca.

2.5 NARAVNO STARANJE

2.5 NATURAL WEATHERING

Vzorce smo za 12 mesecev izpostavili naravnim pogojem, kot to opisuje ISO 2810 (2020). Pred izpostavitvijo smo konce vzorcev zatesnili s silikonom, da bi jih dodatno zaščitili. Vzorce smo nato vstavili

v poševno stojalo in jih pritrdili. Med vzorci je bilo 2-3 cm razmika. Na vsake tri mesece smo eksperiment prekinili, da smo izmerili spremembe v barvi in sijaju. Eksperiment je potekal med 10. julijem 2024 in 14. julijem 2025. Meteorološki podatki (temperatura zraka in količina padavin) za obdobje izpostavitve so dostopni na spletni strani Agencije Republike Slovenije za okolje (2025), merilna postaja Ljubljana Bežigrad.

2.6 BARVA IN SIJAJ

2.6 COLOUR AND GLOSS

Barvo in sijaj smo izmerili z merilnikom barve SP62 D65 spectrophotometer (X-Rite, Grand Rapids, MA, USA) in merilnikom sijaja (X-Rite AcuGloss TRI Gloss Meter) pred začetkom eksperimenta ter po 3, 6, 9 in 12 mesecih od začetka zunanje izpostavitve. Sijaj smo izmerili po standardu (ISO 2813:2014) z merilnikom sijaja. Meritev je bila izvedena pod kotom 60° vpadne svetlobe, vzporedno z vlakni lesa v vzdolžni smeri.

Barvo smo izmerili po standardih (CIE 15:2018; ISO/CIE 11664-4) s spektrofotometrom s standardno osvetlitvijo D65. Pridobljene meritve so izražene v CIELAB barvnem prostoru (parametri L^* , a^* in b^* , njihove spremembe ter celokupna sprememba barve ΔE^*). Spremembo barve smo izračunali po CIEDE2000 formuli (Sharma et al., 2005) z uporabo enačbe 1.

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

Parameter L^* se giblje od 0 do 100, kjer 0 predstavlja črnino, 100 pa največjo svetlost, izračunano iz relativne svetlosti vzorčne barve na podlagi tristimulusnih vrednosti. Parametra a^* (od -300 do 220) in b^* (od -200 do 160) označujeta barvni smeri rdeča-zelena in rumena-modra, pri čemer pozitivne vrednosti pomenijo rdečino oziroma rumenost, negativne pa zelenost oziroma modrinost; oba sta prav tako izračunana iz tristimulusnih vrednosti. Skupno barvno spremembo je mogoče določiti z enačbo 1, ki upošteva spremembe vseh barvnih parametrov.

Meritve barve in sijaja smo izvedli na sredini in na nasprotnih robovih vzorca (tri meritve na vzorec), pri čemer smo se izognili naravnim razbarvanjem ali grčam, en referenčni vzorec za vsak sistem pa je bil shranjen v temi za kontrolo.

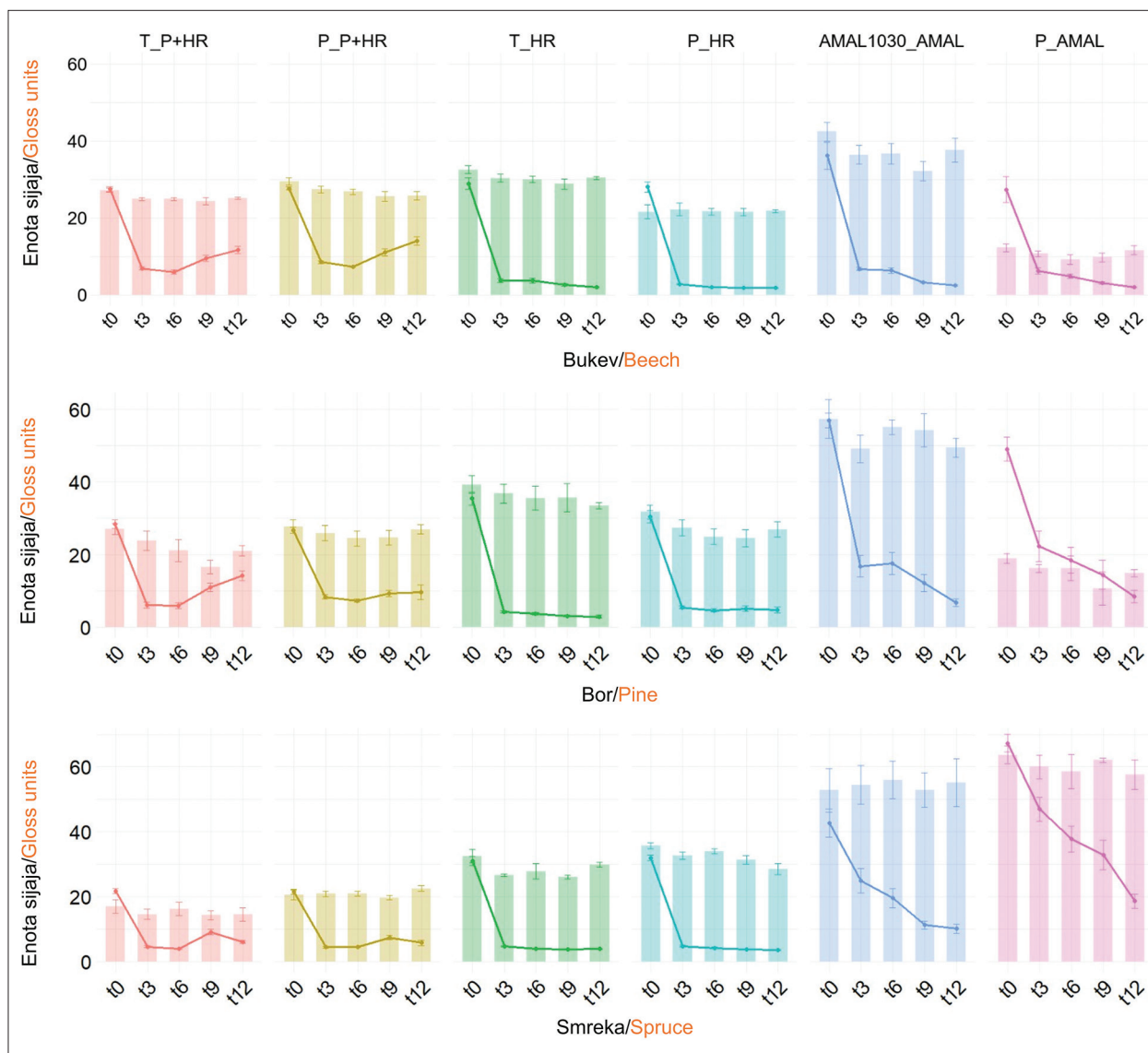
3 REZULTATI IN DISKUSIJA

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 SIJAJ

3.1 GLOSS

Pri vseh vzorcih, ne glede na uporabljeno lesno vrsto, metodo čiščenja ali premaz, smo opazili največji upad sijaja po prvih treh mesecih zunanje izpostavitve. Prav tako je pri vseh vzorcih končni sijaj nižji kot začetni, kar se sklada z našimi pričakovanji. Vzorci so v enem letu zunanje izpostavitve izkusili vse štiri letne čase ter številne spremembe temperature in vlage, kar je vplivalo na njihov sijaj. Pri smreki in boru imajo najvišji začetni sijaj vzorci, ki so premazani z alkidnim brezbarvnim premazom AMAL, česar pa pri bukvi ne opazimo, saj imajo vsi vzorci približno enak začetni sijaj. Sijaj večine vzorcev po treh mesecih pade pod 10 GU, zaradi česar smo težko primerjali vzorce, saj so meritve pod to mejo manj zanesljive. Kot priporoča literatura (Sönmez, 2020), smo sijaj ponovno izmerili pri 85°, vendar so tudi te meritve dale vrednosti sijaja pod 10 GU. Pri vzorcih, ki so premazani s temeljnim premazom in premazom proti obraščanju, lahko opazimo dvig sijaja po več mesecih izpostavitve. To pripisujemo spiranju premaza proti obraščanju, ki razkrije še ohranjen premaz temeljnega premaza. Ker ta še ni bil izpostavljen zunanjim vremenskim dejavnikom, ima ohranjen prvotni sijaj. Sijaj pri vzorcih, kjer smo uporabili premaz proti obraščanju, je odvisen le od samega premaza, saj je popolnoma prekriven. Alkidni AMAL premaz pa je prozoren, zato k sijaju pripomore tudi lastnost prekritega lesa. Pred začetkom naravnega staranja med vzorci, očiščenimi s plazmo ali katerim koli od testiranih sredstev, pri nobeni od treh lesnih vrst nismo zaznali statistično značilnih razlik v sijaju, z izjemo smreke. Tu so imeli vzorci, očiščeni s plazmo in premazani z alkidnim premazom, statistično značilno višji sijaj (t-test, $p < 0,05$) v primerjavi z vzorci, očiščenimi s topilom na osnovi nafte (AMAL 1030). Enak vzorec rezultatov smo opazili tudi po enoletni zunanji izpostavitvi, dodatno pa se je statistično značilna razlika pojavila še pri bukovih vzorcih, premazanih z alkidnim premazom, kjer so imeli vzorci, očiščeni s plazmo, statistično značilno nižji sijaj. Rezultati sijaja so predstavljeni na sliki 1.



Slika 1. Povprečni sijaj vzorcev skozi enoletno obdobje zunanje izpostavitve s standardno napako. Sijaj je predstavljen v petih časovnih enotah (1 časovna enota je 3 mesece) tekom zunanje izpostavitve, kot tudi temna kontrola za vsako metodo (stolpci predstavljajo temno kontrola, črte pa vzorce, ki so bili naravno starani). T/P/AMAL1030 – očiščeno s terpentinom/plazmo ali topilom na osnovi nafte. P+HR – temeljni premaz s premazom proti obraščanju, HR – brez temeljnega premaza, samo premaz proti obraščanju in AMAL – alkidni prozorni premaz. t0 – pred naravnim staranjem, t03 – po 3 mesecih, t06 – po 6 mesecih, t09 – po 9 mesecih in t12 po enem letu zunanje izpostavitve.

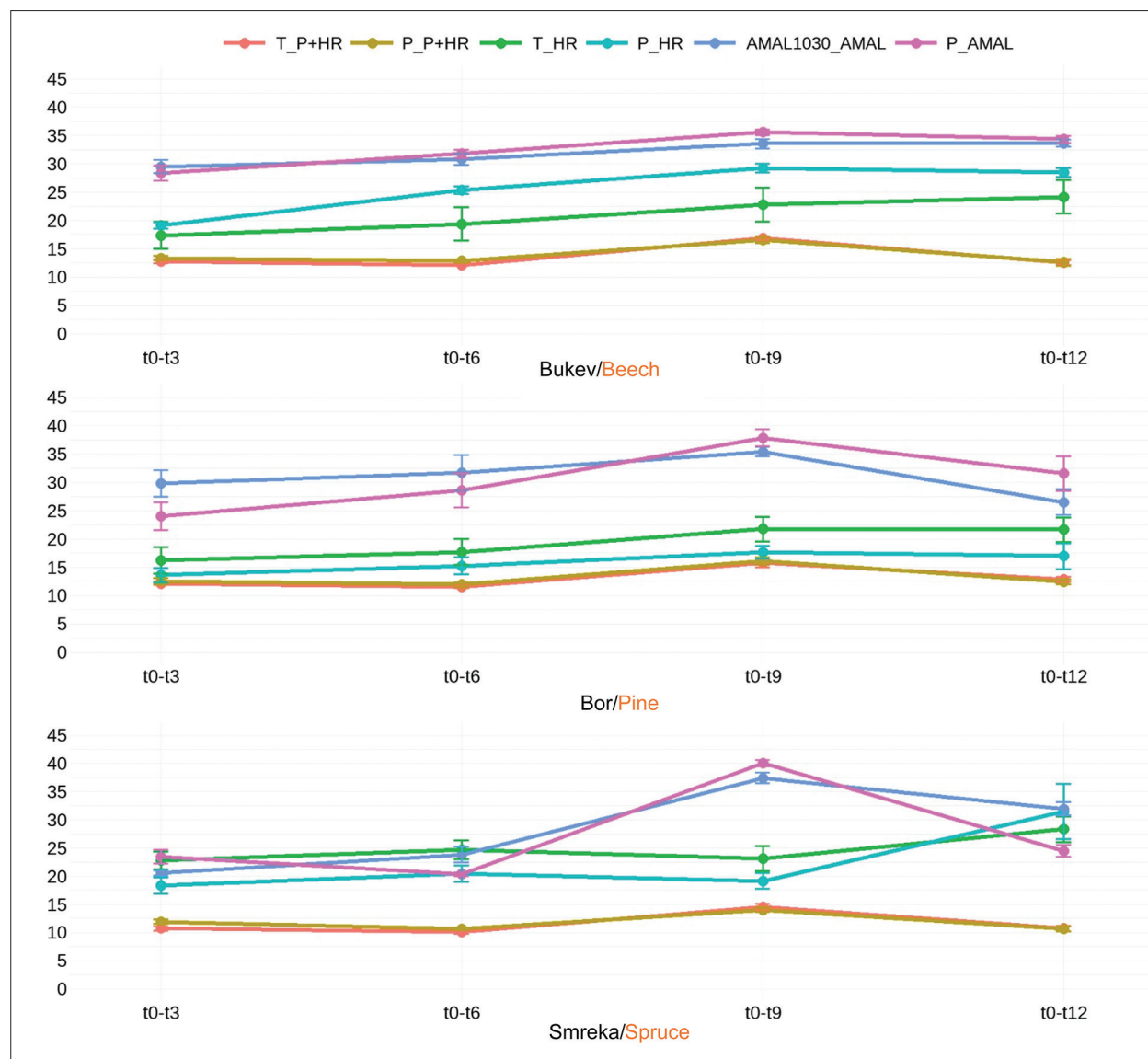
Figure 1. Average gloss at five measurement points during natural weathering of the samples (with standard error), as well as a dark reference for each method (bars represent dark reference, and lines represent naturally weathered samples). T/P/AMAL1030 – cleaned with turpentine/plasma or petroleum-based solvent. P+HR – primer with hard racing, HR – no primer, just hard racing and AMAL – alkyd-based clear varnish. t0 – before natural weathering, t03 – after 3 months, t06 – after 6 months, t09 – after 9 months and t12 – after one year of natural weathering.

3.2 SPREMEBA BARVE

3.2 COLOUR CHANGE

Barvne spremembe smo primerjali glede na začetno stanje pred zunanjo izpostavitvijo in so predstavljene na sliki 2. Podobno kot pri sijaju opazimo največjo spremembo barve po prvih treh

mesecih izpostavitve, predvsem na vzorcih, kjer smo uporabili alkidni brezbarvni premaz AMAL, najmanjše spremembe pa so pri vzorcih, kjer smo uporabili tako temeljni premaz kot tudi premaz proti obraščanju. Kjer temeljnega premaza nismo uporabili, je premaz proti obraščanju hitro začel



Slika 2. Sprememba barve v primerjavi z barvo pred začetkom naravnega staranja (s standardno napako). t0-t3 – po 3 mesecih, t0-t6 – po 6 mesecih, t0-t9 – po 9 mesecih in t0-t12 po enem letu zunanje izpostavitve. T/P/AMAL1030 – očiščeno s terpentinom/plazmo ali topilom na osnovi nafte. P+HR – temeljni premaz s premazom proti obraščanju, HR – brez temeljnega premaza, samo premaz proti obraščanju in AMAL – alkidni prozorni premaz.

Figure 2. Change in colour (ΔE^*) compared to the colour before natural weathering (with standard error). t0-t3 – after 3 months, t0-t6 – after 6 months, t0-t9 – after 9 months and t0-t12 – after 12 months of natural weathering. T/P/AMAL1030 – treated with turpentine/plasma or petroleum-based solvent. P+HR – primer with hard racing, HR – no primer, just hard racing and AMAL – alkyd-based clear varnish.

odstopati, kar je privedlo do izpostavitve lesa in posledično vplival na barvo. Vpliv na končno barvo je imel tudi temeljni premaz, saj so bili ti vzorci rahlo sivi, v primerjavi z vzorci brez temeljnega premaza, ki so bili bolj svetli. Pri vzorcih z alkidnim premazom pa je na barvo močno vplivala barva lesa, saj je ta premaz brezbarven.

Med izpostavitvijo so se vzorci, premazani s premazom, proti obraščanju, na nekaterih predelih obarvali rumeno. Vzorci, premazani z alkidnim premazom AMAL, so potemneli, prišlo je tudi do izrazitega odstopanja premaza že po treh mesecih izpostavitve. Ti vzorci so imeli na mestih, kjer je premaz odstopil, imeli izrazite sive cone, kjer so različni vremenski in biotski vplivi poškodovali les, saj ni bil več zaščiten s premazom.

3.3 POŠKODBE VZORCEV

3.3 SAMPLE DAMAGE

Odstopanje alkidnega premaza s smrekovih vzorcev je napredovalo hitreje kot pri vzorcih, ki so bili predhodno premazani s topilom na osnovi

nafte AMAL 1030 (slika 3). Pri enakem sistemu na bukvi in boru nismo opazili tega trenda. Ta sistem premaza nas je presenetil in razočaral, saj alkidni premaz AMAL velja za kakovostnega in je namenjen zahtevnejšim uporabam, kot so leseni deli plovil nad vodno linijo. Prav tako proizvajalec navaja, da je premaz odporen proti slani vodi in soncu.

Pri vzorcih brez temeljnega premaza smo opazili, da odstopanje krovnega premaza pri smreki in boru poteka približno enako hitro, ne glede na to, ali je bila površina očiščena s terpentinom ali plazmo. Pri bukovih vzorcih pa smo opazili, da je do hitrejšega in izrazitejšega odstopanja krovnega premaza prišlo pri vzorcih, kjer smo površino očistili s plazmo (slika 4). Rezultat je bil pričakovan, saj proizvajalec eksplicitno navaja uporabo krovnega premaza v kombinaciji s temeljnim premazom. S tem smo želeli preveriti, ali bi plazemska predobdelava potencialno lahko nadomestila uporabo temeljnega premaza, vendar smo ugotovili, da je ta nujen za obstojnost krovnega premaza.



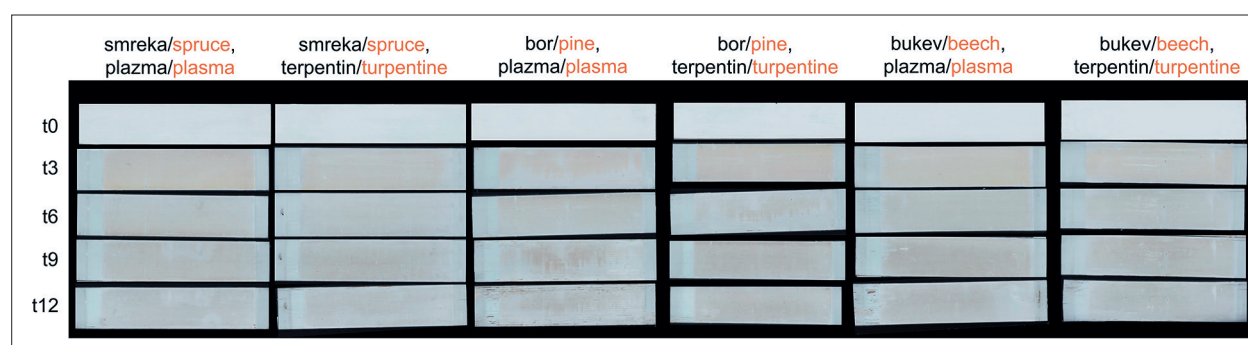
Slika 3. Sistem alkidnega prozornega premaza (AMAL) med enoletno zunanjo izpostavitvijo.

Figure 3. Alkyd clear coating (AMAL) system through one year of outdoor exposure.



Slika 4. Sistem premaza proti obraščanju (HR), brez temeljnega premaza, med enoletno zunanjo izpostavitvijo.

Figure 4. Antifouling (HR) coating system without primer, tested for one year of outdoor exposure.



Slika 5. Sistem premaza proti obraščanju (HR) s temeljnim premazom, med enoletno zunanjo izpostavitvijo.
Figure 5. Antifouling (HR) coating system, with primer, through one year of outdoor exposure.

Pri vzorcih, kjer smo uporabili temeljni premaz in premaz proti obraščanju, ni prišlo do nastanka velikih razpok premazane površine, z izjemo boro-vih vzorcev. Tu smo po šestih mesecih zunanje izpostavitve pri polovici vzorcev, očiščenih s plazmo, opazili nekoliko večje odstopanje premaza v primerjavi z vzorci, očiščenimi s terpentinom (slika 5).

Predvidevamo, da so poškodbe, odstopanje in pokanje premaznih sistemov posledica enostransko premazanih vzorcev. Spodnja stran in stranice vzorcev niso bile premazane, kar je omogočilo vdor vlage iz okolja skozi nepremazano površino. Zaradi tega so ti deli vzorcev ostali neustrezno zaščiteni pred vremenskimi razmerami, biotskimi dejavniki in drugimi okoljskimi vplivi, kar je vodilo do slabše zaščite vzorcev, hitrejša degradacije in povečane dovzetnosti za poškodbe.

Z raziskavo smo potrdili, da je plazemska predobdelava pred nanosom premaza primerljiva predobdelavi s terpentinom ali sintetičnim topilom. Plazma tudi ne vpliva bistveno na spremembo barve in sijaja premaza, kar je pomembno pri izdelkih z visoko dodano vrednostjo.

4 ZAKLJUČEK

4 CONCLUSIONS

Preizkusili smo različne zaščitne premazne sisteme za les, namenjene zahtevnejšim aplikacijam, kot so palube jaht. Proizvajalci priporočajo, da se površina pred nanosom premaza očisti oziroma razmasti. Za ta namen se običajno uporabljajo naravna ali umetna topila, vendar pa je mogoče predobdelavo lesa dosledno izvesti tudi z netermičnimi plazemskimi postopki, ki delujejo pri atmosferskem tlaku in uporabljajo zrak kot delovni plin. S študijo

smo ovrednotili možnost nadomestitve tradicionalnih topil s plazemskim čiščenjem pri pripravi lesnih površin. Testirali smo dva premaza (premaz iz epoksidnih smol in alkidni premaz) na treh lesnih vrstah (bor, smreka in bukev) ter tri vrste čiščenja (DCSBD plazma, terpentin in topilo na osnovi nafte). Vzorce smo za eno leto izpostavili naravnim razmeram, na vsake tri mesece smo izmerili spremembo barve in sijaja. Pred naravnim staranjem, med vzorci, očiščenimi s plazmo ali testiranimi sredstvi, pri nobeni izmed treh lesnih vrst ni bilo razlik v sijaju, največje razlike so se pojavile po treh mesecih staranja. Izjema je bila smreka, kjer so vzorci, premazani z alkidnim premazom in očiščeni s plazmo, imeli višji sijaj v primerjavi z vzorci, očiščenimi s topilom na osnovi nafte. Po enoletni zunanji izpostavitvi se je enak trend pri smreki ohranil, dodatno pa se je razlika pojavila še pri bukvi, kjer so imeli z alkidnim premazom premazani vzorci, očiščeni s plazmo, nižji sijaj. Po prvih treh mesecih izpostavitve smo največje barvne spremembe zaznali predvsem pri vzorcih z alkidnim brezbarvnim premazom AMAL, medtem ko so bile spremembe najmanj izrazite pri vzorcih, kjer je premaz vključeval tako temeljni premaz kot tudi premaz proti obraščanju. V primerih, kjer temeljni premaz ni bil uporabljen, je prišlo do hitrega odstopanja premaza proti obraščanju, kar je povzročilo razkritje lesa in posledično izrazitejša spremembe barve. Odstopanje alkidnega premaza s smrekovih vzorcev je napredovalo hitreje pri vzorcih, ki so bili premazani s topilom na osnovi nafte. Pri vzorcih, kjer nismo uporabili temeljnega premaza, je premaz proti obraščanju izrazilo popokal in odstopil že po treh mesecih. Pri vzorcih, kjer smo uporabili temeljni premaz in premaz proti obraščanju, nismo opazili znatnega odstopanja, le pokanje

premaza. Ugotovili smo, da je plazemska predobdelava primerna za čiščenje površine pred nanosom premaza, pri tem pa ne vpliva bistveno na vizualne lastnosti premaza.

5 POVZETEK

5 SUMMARY

The use of wood is increasing across sectors, and most wood species require protection against weathering, especially in demanding applications such as decking and applications with water contact. While tropical hardwoods were traditionally used for such purposes, their environmental impact has shifted focus toward locally grown species, which require high-performance coatings to ensure durability. Surface preparation is crucial for coating performance, and conventional methods include planning and solvent-based degreasing or cleaning prior to wood coating. Non-thermal plasma (NTP) offers an environmentally friendly alternative for surface activation and cleaning, improving adhesion by modifying wood chemistry and morphology without the use of solvents. Among NTP technologies, DCSBD plasma is particularly promising for scalable wood treatment, and this study investigated it as a replacement for solvent cleaning prior to the application of epoxy- and alkyd-based coatings on locally grown wood species. We tested three protective coating systems for wood intended for demanding applications, such as yacht decks. Manufacturers recommend cleaning the surface before applying the coating. Typically, natural or synthetic solvents are used for this purpose; however, wood pre-treatment can also be effectively realized using non-thermal plasma processes that operate at atmospheric pressure and utilize air as the working gas. In this study, we evaluated the possibility of replacing traditional solvents with plasma cleaning in the preparation of wood surfaces. We tested two types of coatings (epoxy resin and alkyd-based coating) on three wood species, Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sapwood, Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.), and European beech (*Fagus sylvatica* L.) and compared three cleaning methods: DCSBD plasma, turpentine, and a petroleum-based solvent. The samples were exposed to natural conditions for one year, with colour and gloss changes measured every three months. Before natural

weathering, there were generally no differences in gloss among the samples treated with plasma or the tested cleaning agents across the three wood types. The most significant differences appeared after three months of weathering. An exception was spruce, where the alkyd-coated samples cleaned with plasma exhibited higher gloss than those cleaned with a petroleum-based solvent. After one year of outdoor exposure, this trend persisted for spruce, and an additional difference emerged in beech, where alkyd-coated samples cleaned with plasma showed lower gloss. After the first three months, the most significant colour changes were observed in systems using the alkyd clear coat, while the least changes occurred in systems that included both a primer and an epoxy anti-fouling coating. When a primer was not used, the anti-fouling coating peeled away quickly, exposing the wood and resulting in more pronounced colour changes. The peeling of the alkyd coating from the spruce samples progressed faster than on those coated with the petroleum-based solvent. The system without a primer showed notable blistering and peeling after just three months. Conversely, in the system with both a primer and an anti-fouling coating, no significant peeling was observed; only coating cracking was observed. We have concluded that plasma pretreatment is effective for the cleaning of surfaces prior to coating application, and does not significantly affect the coating's visual properties.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENT

Raziskavo je finančno podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) v okviru raziskovalnega programa Les in lignocelulozni kompoziti (P4-0015) ter projekta Plazemska obdelava poroznih heterogenih substratov na biološki osnovi (N4-0267). Raziskavo sta sofinancirala tudi Češka znanstvena fundacija (GAČR) v okviru projekta GF25-20010L ter Ministrstvo za izobraževanje, mladino in šport Češke republike (MEYS ČR) v okviru projekta LM2023039. Plazemsko obdelavo vzorcev sta opravila sodelavca z Masarykove univerze v Brnu, Michal Pazderka in Jakub Kelar, za kar se jima lepo zahvaljujemo.

DOSTOPNOST RAZISKOVALNIH PODATKOV DATA AVAILABILITY

Skladno z načeli odprte znanosti so raziskovalni podatki na voljo na odprto dostopnem repozitoriju Zenodo na povezavi <https://doi.org/10.5281/zenodo.18494992> in naj bodo citirani kot Dahle (2026).

In accordance with the principles of open science, the research data are available on the open-access repository Zenodo at <https://doi.org/10.5281/zenodo.18494992> and should be cited as Dahle (2026).

VIRI

REFERENCES

- Allen, M. (2006). The complete guide to wood finishes: How to apply and restore lacquers, polishes, stains and varnishes. New York: Simon and Schuster.
- Agencija Republike Slovenije za okolje (2025). Meteorološki podatki za postajo Ljubljana Bežigrad. URL: <https://meteo.arso.gov.si> (27.1.2026)
- Bizjak Štrus, N., Remic, K., Kitek Kuzman, M., Oblak, L., & Dahle, S. (2025). Laboratory-scale life cycle assessment and cost analysis of beechwood degreasing methods. *Wood Material Science & Engineering*, 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2025.2510561>
- Bizjak Štrus, N., Tučeková, Z. K., Brodňanský, D., Kellar, J., & Dahle, S. (2026). DCSBD plasma treatment as an alternative to commercial surface degreasing agents before applying wood coatings. *Cellulose* 33(6), 3587–3600. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-026-07041-z>
- Brischke, C., Meyer-Veltrup, L., & Bornemann, T. (2017). Moisture performance and durability of wooden façades and decking during six years of outdoor exposure. *Journal of Building Engineering*, 13, 207–215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.08.004>
- Bulian, F., & Graystone, J. (2009). *Wood Coatings: Theory and Practice*. Elsevier, Amsterdam. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52840-7.X0001-X>
- Commission Internationale de l'Éclairage (2018). *Colorimetry* (CIE Standard No. 15:2018).
- Černák, M., Černáková, L., Hudec, I., Kováčik, D., & Zahoranová, A. (2009). Diffuse coplanar surface barrier discharge and its applications for in-line processing of low-added-value materials. *The European Physical Journal Applied Physics*, 47(2), 22806. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjap/2009131>
- Dahle, S. (2026). Dcsbd plasma treatment as an alternative to commercial surface degreasing agents before applying coatings to wood [Data set]. Zenodo. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18494992>
- Hillman, H. F. (1956). Woods for small boat construction. *International Shipbuilding Progress*, 3(26), 551–559. DOI: <https://doi.org/10.3233/ISP-1956-32605>
- Humar, M., Kržišnik, D., Lesar, B., & Brischke, C. (2019). The performance of wood decking after five years of exposure: verification of the combined effect of wetting ability and durability. *Forests*, 10(10), 903. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10100903>
- ISO (2014). *Paints and varnishes—Determination of gloss value at 20°, 60° and 85°* (ISO 2813:2014).
- ISO/CIE (2019). *Colorimetry—Part 4: CIE 1976 Lab colour space** (ISO/CIE 11664-4:2019).
- ISO (2020). *Paints and varnishes—Natural weathering of coatings—Exposure and assessment* (ISO 2810:2020).
- Khademibami, L., & Bobadilha, G. S. (2022). Recent developments studies on wood protection research in academia: a review. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 793177. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.793177>
- Klingner, S., Voigts, F., Viöl, W., & Maus-Friedrichs, W. (2013). Analysis of plasma degreased aluminium foil with XPS. *Surface Engineering*, 29(5), 396–401. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743294413Y.0000000129>
- Leon, M., Cornejo, G., Calderón, M., González-Carrión, E., & Florez, H. (2022). Effect of deforestation on climate change: a co-integration and causality approach with time series. *Sustainability*, 14(18), 11303. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141811303>
- Lux, C., Szalay, Z., Beikircher, W., Kováčik, D., & Pulker, H. K. (2013). Investigation of the plasma effects on wood after activation by diffuse coplanar surface barrier discharge. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(5), 539–549. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0706-3>
- Mantanis, G. I., & Young, R. A. (1997). Wetting of wood. *Wood Science and Technology*, 31(5), 339–353. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01159153>
- Odrášková, M., Ráhel', J., Zahoranová, A., Tiňo, R., & Černák, M. (2008). Plasma activation of wood surface by diffuse coplanar surface barrier discharge. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 28(2), 203–211. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11090-007-9117-8>
- Pandit, S. K., Tudu, B. K., Mishra, I. M., & Kumar, A. (2020). Development of stain resistant, superhydrophobic and self-cleaning coating on wood surface. *Progress in Organic Coatings*, 139, 105453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105453>
- Pommier, R., Grimaud, G., Prinçaud, M., Perry, N., & Sonnemann, G. (2016). Comparative environmental life cycle assessment of materials in wooden boat ecodesign. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(2), 265–275. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-015-1009-1>
- Sharma, G., Wu, W., & Dalal, E. N. (2005). The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research & Application*, 30(1), 21–30. DOI: <https://doi.org/10.1002/col.20070>
- Šimor, M., Ráhel', J., Vojtek, P., Černák, M., & Brablec, A. (2002). Atmospheric-pressure diffuse coplanar surface discharge for sur-

- face treatments. *Applied Physics Letters*, 81(15), 2716–2718.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1513185>
- Sönmez, S. (2020). Gloss of Paper. In: Kiran, B., & Balpetek, B. (ED), *Current Researches in Engineering Sciences* (77–89). İzmir: Duvar Publishing.
- Talviste, R., Galmiz, O., Stupavská, M., Tučková, Z., Kaarna, K., & Kováčik, D. (2019). Effect of DCSBD plasma treatment on surface properties of thermally modified wood. *Surfaces and Interfaces*, 16, 8–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.04.005>
- Tu, Y., Liang, J., Yu, L., Wu, Z., Xi, X., Zhang, B., Tian, M., Li, D., & Xiao, G. (2023). Effects of plasma treatment on the surface characteristics and bonding performance of pinus massoniana wood. *Forests*, 14(7), 1346. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14071346>
- Weldon, D. G. (2009). *Failure analysis of paints and coatings*. John Wiley & Sons.
- 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>

