



## KAKOVOST LEPILNEGA SPOJA MED LESOM IN JEKLOM

## THE QUALITY OF ADHESIVE BOND BETWEEN WOOD AND STEEL

Jaša Saražin<sup>1</sup>, Milan Šernek<sup>1\*</sup>

UDK 630\*824.85

Izvilleček / Abstract

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

**Izvilleček:** Cilj raziskave je bil ugotoviti primernost izbranih poliuretanskih in epoksidnih lepil za konstrukcijsko lepljenje lesa in jekla. Preizkusili smo štiri poliuretanska lepila COSMO in dve epoksidni lepili ERGO in XEPOX. Kakovost lepilnega spoja smo ovrednotili s testom strižne trdnosti, ki je sledil posameznim postopkom izpostavitve preizkušancev: izpostavitve standardni klimi, z relativno zračno vlažnostjo 65 % in temperaturo 20 °C; izpostavitve vlažni klimi s 87 % vlažnostjo in temperaturo 20 °C; ter različne izpostavitve (namakanje/kuhanje) v vodi. Rezultati so pokazali, da proučevana poliuretanska lepila z vidika kakovosti lepljenja ne morejo konkurirati epoksidnim lepilom. Proučevani epoksidni lepili sta zagotovili odlično kakovost lepljenja v suhih pogojih ter se izkazali kot pogojno primerni za nekonstrukcijsko rabo v vlažnih pogojih. Za uporabo izbranega lepila v konstrukcijskih aplikacijah je bilo izdano priporočilo, da je potrebno lepilni spoj dodatno ojačati z vijaki, ki bi zagotovili zanesljivost spoja v primeru nastopa izjemne vlage ali požara.

**Ključne besede:** les, jeklo, lepila, epoksi, poliuretan, vlažnost

**Abstract:** The aim of the research was to determine the suitability of selected polyurethane and epoxy adhesives for structural bonding of wood and steel. We tested four polyurethane adhesives COSMO and two epoxy adhesives ERGO and XEPOX. The quality of the adhesive bond was evaluated by a shear strength test followed by one of the following exposure tests of the specimens: exposure to the standard climate with 65 % relative humidity and a temperature of 20 °C; exposure to humid climate with 87 % humidity and a temperature of 20 °C; and various exposures (soaking/cooking) in water. The results showed that the polyurethane adhesives studied in this work cannot compete with epoxy adhesives in terms of bonding quality. The epoxy adhesives provided excellent bonding properties in dry conditions, and proved to be potentially suitable for non-structural use in humid conditions. However, in order to use the selected adhesives in construction applications, it is recommended that the adhesive joint should be additionally reinforced with screws to ensure the reliability of the joint in the event of exceptional moisture or fire.

**Keywords:** wood, steel, adhesives, epoxy, polyurethane, moisture

## 1 UVOD

### 1 INTRODUCTION

Lepljenje kovine in lesa že od nekdaj predstavlja svojevrsten izziv. Ta dva popolnoma različna materiala se običajno lepita tudi s popolnoma različnimi lepili. Les kot zelo porozen material se lepi z uporabo visokega tlaka, ki je gonilna sila za zadostno penetracijo lepila in njegovo sidranje v porozno površino med procesom utrjevanja. Pri kovini pa bi zaradi neporoznosti materiala z uporabo visokega tlaka večino lepila iztisnili iz lepilnega spoja.

Prav tako različno je tudi obnašanje teh dveh materialov. Ob spreminjanju klime se dimenzije lesa najbolj spreminjajo z variranjem vlage v lesu, med-

tem ko temperaturne spremembe ključno vplivajo na dimenzijske spremembe kovin. Zelo različna pa je tudi togost materialov, kar se neugodno odraža v neenakomernem raztezanju materialov ob obremenitvi.

Prav zaradi naštetih diametralnih lastnosti lesa in jekla se lepljenja enega z drugim izogibamo. Povezavo med kovino in lesom se tako najpogosteje zagotavlja z vijačenjem. Pomanjkljivost vijačnega spoja pa je v tem, da je le-ta manj tog od lepilnega spoja, poleg tega s samimi vijaki les oslabimo ter ga tudi lokalno preobremenimo. Zaradi naštetega bi lahko, ob zagotovitvi kvalitetnega lepilnega spoja med kovino in lesom, dimenzionirali manjše elemente, ki bi bili med seboj bistveno bolj togo povezani. Tako bi privarčevali pri materialu in masi konstrukcije. Istočasno bi s kvalitetnim lepilnim spojem tudi zmanjšali število vijakov, ki lahko predsta-

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, SLO

\* e-pošta: milan.sernek@bf.uni-lj.si

vljajo toplotne mostove in niso vedno zaželeni z estetskega vidika.

Lepila, ki se uporabljajo pri lepljenju lesa in kovine, so največkrat epoksidna, poliuretanska in izjemoma tudi resorcinolna (Steiger et al., 2015). Epoksidna lepila so najzanesljivejša in v praksi najpogosteje uporabljena pri lepljenju lesa in kovine (Mravljak, 2014). Prednost poliuretanskih lepil pa je predvsem nižja nabavna cena.

V nadaljevanju je predstavljenih nekaj aktualnih področij raziskav na temo lepljenja lesa in jekla. Vlepljanje jeklenih navojnih palic v lesene nosilce je poznano že iz 80-ih let prejšnjega stoletja. Tako vzdolžno kot tudi prečno vlepljanje jeklenih palic z metriskim navojem v nosilce iz lepljenega lamelirnega lesa (GLULAM) ali furnirnega slojnatega lesa (LVL) je bilo na evropskih tleh že dobro raziskano ter tudi v praksi mnogokrat uporabljeno (Tlustochowicz et al., 2011; Steiger et al., 2015). Še vedno pa v številnih raziskavah proučujejo vpliv posameznih klimatskih dejavnikov na kakovost lepilnega spoja med lesom in jeklom ter primernost izbranih lepil za tovrstno uporabo, z namenom povišanja odpornosti lepilnega spoja. Tako povišana vlažnost kot tudi povišana temperatura namreč negativno vplivata na kakovost lepilnega spoja (Mravljak, 2014), zato je lepljenje lesa in jekla zaenkrat omejeno na razreda uporabe 1 in 2 (po Evrokodu 5 (SIST EN 1995-1-1)), ki predvidevata maksimalen delež vlage v lesu 20 % (Steiger et al., 2015).

Proučevanje vpliva povišane temperature je zanimivo z vidika skrajševanja dolgih časov utrjevanja lepil ter zaradi toplotne (požarne) odpornosti samega lepilnega spoja. Les in konstrukcijski lesni kompoziti se v primeru požara obnašajo zelo predvidljivo: pri večjih presekih les počasi zgoreva po obodu, njegovo jedro pa zaradi visoke izolativne sposobnosti ostaja nepoškodovano. Zato je ob primerno dimenzioniranih lesenih presekih objekt lahko še dolgo po začetku požara varen. Če pa je ognju izpostavljena kovina, le-ta kot dober prevodnik hitro prenese toploto do lepilnega spoja. Park et al. (2004) so za dve testirani epoksidni lepili (eno namenjeno gradnji čolnov ter GLULAM konstrukcij, drugo pa s povečano požarno odpornostjo za vlepljanje jekla v betonske konstrukcije) ugotovili, da se občutno nižanje trdnosti lepilnega spoja začne pri 50 °C, medtem ko pri 100 °C ostane le še 30 % trdnosti, v primerjavi s tisto pri 20 °C. Če med požarom ni

prišlo do porušitve spoja, je lahko ta po ohladitvi ponovno dosegel svojo polno trdnost. Verdet et al. (2016) so za proučevana epoksidna in poliuretanska konstrukcijska lepila ugotovili, da je maksimalna temperatura uporabe utrjenega lepilnega spoja 40 °C. Pri obeh lepilih so zabeležili približno 70 % padec prvotne trdnosti že pri temperaturi 70 °C.

Področje obnavljanja starih lesenih konstrukcij, kjer na samem delovišču v obstoječe tramove vlepljajo kovinske elemente, predstavlja drugo zanimivo nišo pri konstrukcijskem lepljenju lesa in kovine. Alam et al. (2009) so smrekove tramove upogibno obremenjevali do porušitve, nakar so jih popravili z uporabo epoksidnega lepila in kovine ali drugega ojačitvenega materiala. Ugotovili so, da so jekleni profili, ki so bili z epoksidnim lepilom vlepljeni v žlebove na zgornji in spodnji strani porušeni tramov, zagotovili višjo upogibno trdnost in togost tramov v primerjavi s stanjem pred porušitvijo. Metelli et al. (2015) so na primerljiv način ojačali macesnov tram v palači iz 15. stoletja. 14-letni monitoring številnih parametrov v ojačanem tramu pa je dokazal primernost metode za tovrstno uporabo. Cenci (2005) poroča o ojačanju približno 200 let starih tramov v stavbi v Benetkah z uporabo epoksidnih lepil in jeklenih palic.

Cilj te raziskave je bil ugotoviti primernost poliuretanskih in epoksidnih lepil za lepljenje lesa in jekla v konstrukcijskih vezeh, v različnih pogojih uporabe. Osredotočili smo se na ugotavljanje vpliva vlage na kakovost lepilnega spoja med smrekovino in jeklom. Ta materiala sta v praksi pogosto uporabljena v konstrukcijah.

## 2 MATERIAL IN METODE

### 2 MATERIALS AND METHODS

#### 2.1 PRIPRAVA MATERIALOV IN LEPLJENJE

##### 2.1 MATERIAL PREPARATION AND BONDING

Testiranje smo izvedli po standardu (SIST EN 205, 2016), vendar s prilagoditvijo glede izbora materialov za lepljenje. Izdelali smo smrekove lamele dimenzij 150 mm × 20 mm × 5 mm, z usmerjenostjo lesnih vlaken med 30° in 90° glede na površino lepljenja, in jeklene lamele dimenzij 120 mm × 20 mm × 8 mm. Pred lepljenjem so bile jeklene lamele zbrušene in razmaščene, lesene lamele pa zbrušene in izpihane. Oba izdelana elementa/lepljenca smo v



Slika 1. Geometrija preklopa lepjenca iz smrekove in jeklene lamele

Figure 1. Geometry of a single-lap test piece made from spruce wood and steel lamellae.

posebej pripravljene šablone preklopili po dolžini za 10 mm, kar je prikazano na sliki 1. Vse površine lepilnih spojev smo merili individualno. Povprečna vrednost vseh testiranih površin je znašala 232 mm<sup>2</sup>. Odvečno lepilo, ki se je iztisnilo iz spoja in bi s tem vplivalo na rezultate, smo odstranili v največji možni meri. Lepljenje je vedno potekalo pri sobnih pogojih.

Z vijaki šablone smo preklope, lepljene s poliuretanskim lepilom (po navodilih proizvajalca), stisnili z 1 MPa tlaka (Škamlec, 2017). Pri preklopih, lepljenih z epoksidnim lepilom, pa so bili uporabljeni distančniki, ki so zagotovili debelino lepilnega spoja med 0,3 mm in 0,5 mm, kar je običajno najmanjša priporočena debelina lepilnega spoja pri epoksidnih lepilih.

Preizkusili smo štiri poliuretanska ter dve epoksidni lepili:

- COSMO PU 100.110 (enokomponentno poliuretansko)
- COSMO PU 180.150 (enokomponentno poliuretansko)
- COSMO PU 190.110 (enokomponentno poliuretansko z dodanimi steklenimi vlakni)
- COSMO PU 200.281 (dvokomponentno poliuretansko)
- ERGO 7420 (dvokomponentno epoksidno)
- XEPOX 40 (dvokomponentno epoksidno)

## 2.2 TEST STRIŽNE TRDNOSTI LEPILNEGA SPOJA

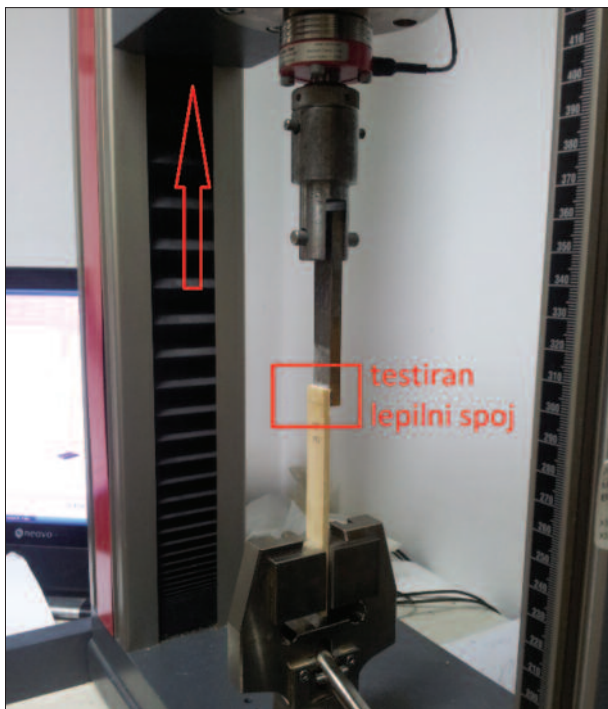
### 2.2 SHEAR STRENGTH TEST OF ADHESIVE BOND

Vsa testirana poliuretanska lepila so deklarirana skladno s standardom (SIST EN 204, 2016) (za nekonstrukcijsko rabo) v najvišji trajnostni razred (durability class) D4, medtem ko epoksidni lepili nista

deklarirani po standardih za lepljenje lesa. Standardni postopek za določitev kakovosti lepilnega spoja je test strižne trdnosti, ki sledi predhodni izpostavitvi preizkušancev izbranim klimatskim pogojem. Po pregledu standardov, ki urejajo to področje (SIST EN 204, 2016; SIST EN 12765, 2016; SIST EN 15425, 2017), ter zaradi primerljivosti rezultatov raziskave z drugimi relevantnimi raziskavami (Mravljak, 2014) smo se odločili za tri vrste osnovnih izpostavitvev:

- **Standardna klima (20/65)** - utrjevanje lepila in klimatiziranje preizkušancev v standardni klimi, to je pri relativni zračni vlagi 65 % ± 5 % in temperaturi 20 °C ± 2 °C,
  - **Vlažna klima (20/87)** - utrjevanju lepila v standardni klimi je sledilo klimatiziranje preizkušancev pri relativni zračni vlagi 87 % ± 5 % in temperaturi 20 °C ± 2 °C,
  - **1 dan v vodi** - utrjevanju lepila v standardni klimi je sledilo 24-urno namakanje v vodi s temperaturo 20 °C ± 5 °C;
- ter še dva dodatna tipa izpostavitvev, katerim smo izpostavili samo izbrana lepila, ki so se zadovoljivo izkazala pri predhodnih izpostavitvah:
- **4 dni v vodi** - utrjevanju lepila v standardni klimi je sledilo 4-dnevno namakanje v vodi s temperaturo 20 °C ± 5 °C in
  - **Kuhanje v vodi** - utrjevanju lepila v standardni klimi je sledilo 3-urno namakanje v vreli vodi, za tem pa še 2-urno hlajenje v vodi s temperaturo 20 °C.

Strižna trdnost lepilnega spoja je definirana kot kvocient med največjo doseženo silo ( $F_{max}$ ) in površino lepilnega spoja (A). Določali smo jo z nateznim testom preizkušancev, na stroju Zwick Z005, s kon-



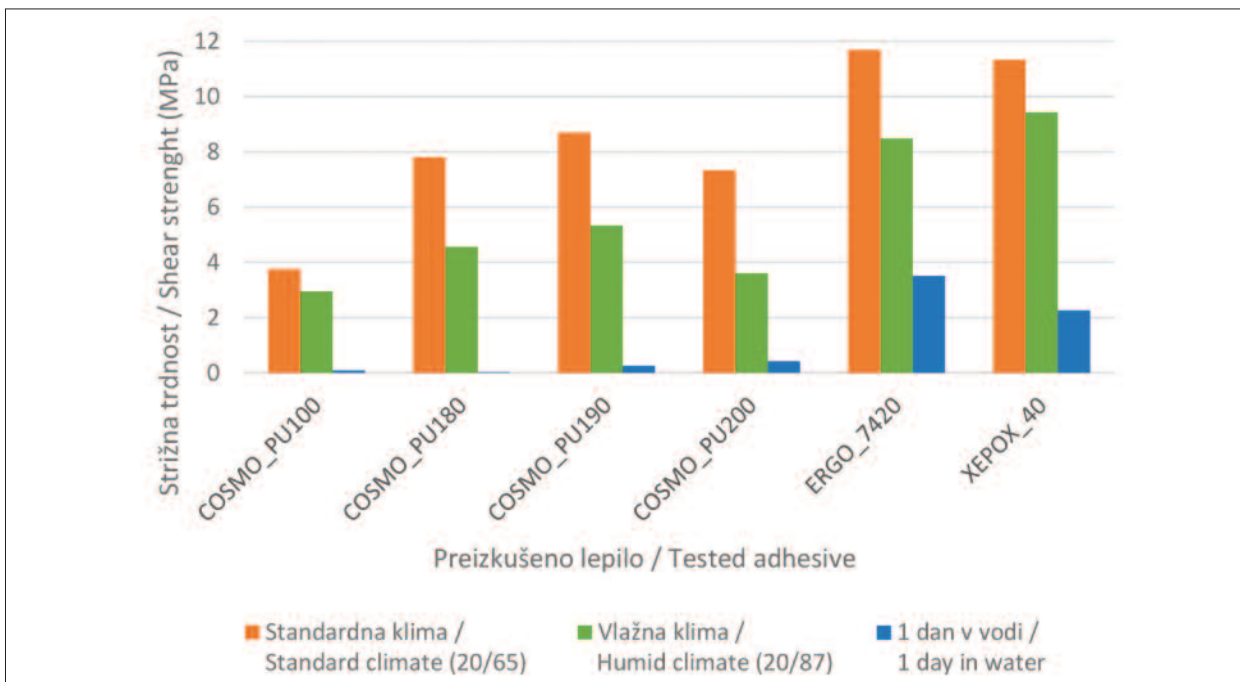
Slika 2. Prikaz vpetja preizkušanca za izvedbo testa strižne trdnosti lepilnega spoja na stroju Zwick Z005.  
 Figure 2. Display of the clamping of the test specimen while performing the shear strength test of the adhesive bond on the Zwick Z005.

stantnim pomikom glave 2 mm/min (slika 2). Za vsako kombinacijo proučevanega lepila in izpostavitve je bilo preizkušenih vsaj 10 preklapov.

Da bi lepilni spoj zadovoljil zahteve lepil za les, bi morala povprečna strižna trdnost spoja v standardni klimi (20/65) doseči vsaj 10 MPa, po namakanjih in kuhanju v vodi pa vsaj 4 MPa. Zaradi prirejenega postopka testiranja z drugimi materiali (smrekovina in jeklo), kot jih predvidevajo standardi (bukovina), sta ti mejni vrednosti služili zgolj za orientacijo.

Pri projektiranju nosilnih konstrukcij so poleg povprečnih vrednosti zelo pomembne tudi karakteristične vrednosti. Te nam povedo, kolikšno vrednost dosega 95 % preizkušancev (5-percentilna vrednost). Karakteristične vrednosti povedo veliko o zanesljivosti lepilnega spoja v posameznih pogojih izpostavitve ter raztrosu dobljenih vrednosti. Vse statistične obdelave podatkov (vključno z ANOVA testom za ugotavljanje statistično značilnih razlik med skupinami ter tudi izračunom 5-percentilnih vrednosti) smo izvedli s programom Microsoft Excel.

Po opravljenem testu strižne trdnosti smo vizualno ocenjevali tudi način porušitve preizkušancev (Saražin & Šernek, 2017). Pojavljali so se trije načini porušitev: adhezivni lom med lepilom in kovino, ad-



Slika 3. Strižna trdnost lepilnih spojev glede na vrsto izpostavitve za preizkušena lepila  
 Figure 3. Shear strength of the adhesive bond for the various adhesives and exposure treatments.



hezivni lom med lepilom in lesom ter kohezivni lom po lesu. Lom po lesu je bil najbolj zaželen, saj je nakazoval, da je bil potencial lepila izkoriščen v celoti. Delež posameznega načina porušitve smo ocenjevali na 5 % natančno.

### 3 REZULTATI IN RAZPRAVA

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

Na sliki 3 so predstavljeni skupni rezultati meritev strižne trdnosti lepilnih spojev po osnovnih izpostavitvah. Vlažnost smrekovih lamel je po klimatiziranju v standardni klimi (20/65) bila 12 %, njihova povprečna gostota pa je pri tej vlažnosti lesa znašala 505 kg/m<sup>3</sup>. Po klimatiziranju v vlažni klimi (20/87) je povprečna vlažnost smrekovih lamel znašala 19 %.

Testirani preizkušanci, ki so bili zlepljeni s poliuretanskimi lepili, niso dosegli orientacijskih mejnih vrednosti. Pri izpostavitvi tako v standardni (20/65), kot tudi v vlažni klimi (20/87), so najvišje strižne trdnosti lepilnega spoja izkazali preizkušanci, zlepljeni z lepilom COSMO PU 190.110, ki ima ojačano strukturo s steklenimi vlakni. Sledili sta mu lepila COSMO PU 180.150 in 200.281, bistveno nižje rezultate od ostalih treh lepil pa je doseglo lepilo COSMO PU 100.110. Po 24-urnem namakanju v vodi je večina preizkušancev, zlepljenih s poliuretanskim lepilom, popustila že pred vpetjem v testirni stroj, preostanek preizkušancev pa se je porušil ob minimalni obremenitvi. Na podlagi dobljenih rezultatov smo zaključili, da testirana poliuretanska lepila niso primerna za lepljenje lesa in jekla za uporabo v vlaž-

nejših pogojih, bi pa najverjetneje lahko bila lepila COSMO PU 190.110, 180.150 in 200.281, ob optimizaciji postopka lepljenja primerna za nekonstrukcijsko lepljenje lesa in jekla za uporabo v suhih pogojih.

Na sliki 3 je razvidno, da sta se pri vseh izpostavitvah najbolje obnesli epoksidni lepila. Zato sta bili izbrani v ožji izbor za nadaljnje proučevanje, ki je zajemalo dodatni izpostavitvi ostrejšim pogojem. V preglednici 1 so prikazane nekatere statistične veličine izbranih epoksidnih lepil glede na izpostavitve preizkušancev pred testiranjem, ki jih predvidevajo standardi.

Povprečni strižni trdnosti obeh epoksidnih spojev sta v standardni klimi presegle orientacijsko mejno vrednost 10 MPa. Prav tako sta se tej vrednosti zelo približali tudi njuni karakteristični vrednosti, kar nakazuje na visoko stopnjo zanesljivosti teh lepilnih spojev. Povprečni vrednosti strižnih trdnosti lepil ERGO in XEPOX nista izkazali statistično značilnih razlik ( $p = 0,41$ ). Pri lomih preizkušancev je prevladoval želen tip porušitve po lesu, v kombinaciji s porušitvijo med lepilom in kasnim lesom.

Razlike med eno- in štiri-dnevnim namakanjem v vodi, tako za lepilo ERGO ( $p = 0,09$ ) kot tudi za lepilo XEPOX ( $p = 0,18$ ), se niso izkazale kot statistično značilne. Povprečne vrednosti strižnih trdnosti so bile sicer bistveno višje kot pri preizkušancih, zlepljenih s poliuretanskimi lepili, vendar vseeno niso dosegale orientacijske mejne vrednosti 4 MPa. Ker razlike med strižnimi trdnostmi, ugotovljenimi po obeh izpostavitvah v hladni vodi niso bile potrjene, je smiselna skupna obravnava rezultatov. Preizku-

Preglednica 1. Strižne trdnosti lepilnih spojev za izbrani lepila z osnovnimi statističnimi kazalniki

Table 1. Shear strength of the adhesive bonds for the studied adhesives with basic statistical indexes.

Izpostavitev / Exposure	Lepilo / Adhesive	Povprečna vrednost / Average strength (MPa)	St. odkl. (koef. variac.) / St. dev. (coef. varian.) (MPa)	Karakteristična trdnost / Characteristic strength (MPa)	Število preizkušancev / Number of samples
Standardna klima / Standard climate (20/65)	ERGO 7420	11,7	1,2 (10 %)	10,0	24
	XEPOX 40	11,3	1,9 (17 %)	8,7	37
1 dan v vodi / 1 day in water	ERGO 7420	3,5	2,1 (60 %)	1,0	29
	XEPOX 40	2,3	1,9 (83 %)	0,0	74
4 dni v vodi / 4 days in water	ERGO 7420	2,6	2,0 (77 %)	0,1	28
	XEPOX 40	2,9	1,6 (55 %)	0,0	22
Kuhanje v vodi / Boiling in water	ERGO 7420	5,1	3,0 (59 %)	0,3	14
	XEPOX 40	1,8	2,6 (144 %)	0,0	25

šanci, zlepljeni z lepilom ERGO, so tako v povprečju dosegli strižno trdnost 3,0 MPa, ki se mejno statistično razlikuje ( $p = 0,05$ ) od 2,4 MPa, ki so jih dosegli preizkušanci, zlepljeni z lepilom XEPOX.

Največje razlike med preizkušenima lepiloma so se pokazale pri kuhanju v vodi, kjer so z lepilom ERGO zlepljeni preizkušanci presegli orientacijsko mejno vrednost 4 MPa. Ugotovljena strižna trdnost preizkušancev, zlepljenih z lepilom ERGO (5,1 MPa), je visoko statistično različna ( $p = 0,001$ ) od strižne trdnosti preizkušancev, zlepljenih z lepilom XEPOX (1,8 MPa).

Pri vseh vrstah izpostavitve v vodi so kot najbolj kritične izstopale karakteristične vrednosti strižnih trdnosti lepilnih spojev. Zaradi velikega raztrosa podatkov in posameznih preizkušancev, ki so se porušili že pred vpetjem v testirno napravo, so le-te blizu 0 MPa. Pri preizkušancih, zlepljenih z lepilom XEPOX, je bilo takih ne-testiranih primerov prek 20 %. Pri preizkušancih, zlepljenih z lepilom ERGO, pa je bilo takih primerov bistveno manj, zato so njihove karakteristične vrednosti rahlo višje od 0 MPa.

Po namakanjih v vodi se način porušitve ni bistveno razlikoval med preizkušenima epoksidnima lepiloma. V povprečju je na 59 % površin do porušitve prišlo med jeklom in lepilom, na 38 % površin se je porušitev zgodila med lesom in lepilom, medtem

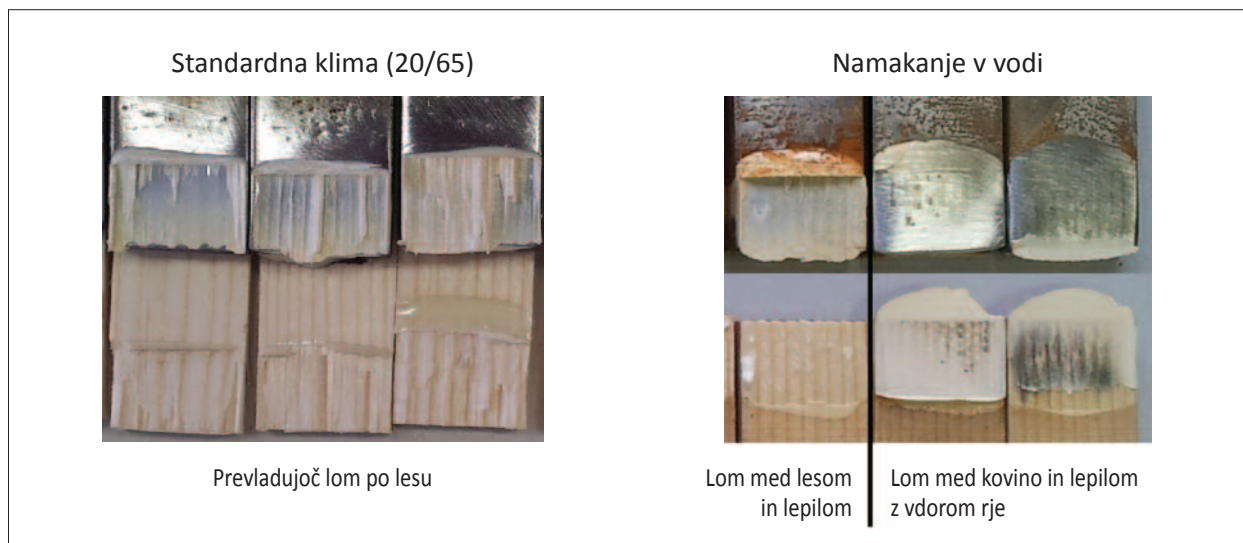
ko je bila porušitev po lesu prisotna na le slabih 3 % površin (Slika 4). So pa bile značilne razlike ugotovljene v protikorozijski odpornosti posameznega lepila. Pri lepilu XEPOX je bila pri eni tretjini preizkušancev, ki so bili namakani v vodi, opažena korozija v spoju (Slika 4 desno). Pri lepilu ERGO pa je bila ta opažena le pri slabi desetini preizkušancev. Pojav korozije je večinoma rezultiral v nizkih strižnih trdnostih preizkušancev (pod 0,5 MPa) in je bil glavni vzrok za nizke karakteristične vrednosti.

Iz ugotovljenega lahko zaključimo, da je uporaba lepila ERGO v splošnem zagotovila kakovostnejši in zanesljivejši lepilni spoj med lesom in jeklom, z večjo povprečno strižno trdnostjo, z višjimi karakterističnimi vrednostmi in nižjimi koeficienti variacije.

#### 4 SKLEPI

#### 4 CONCLUSIONS

Na podlagi rezultatov dosedanjih raziskav smo ugotovili, da proučevana poliuretanska lepila glede kakovosti lepljenja lesa in jekla ne morejo konkurirati epoksidnim lepilom. Izmed vseh preizkušenih lepil sta se le epoksidni lepili ERGO in XEPOX izkazali kot pogojno primerni za lepljenje lesa in jekla. Pri te-



Slika 4. Značilni tipi porušitev lepilnega spoja med lesom in jeklom za preizkušance, lepljene z lepilom XEPOX 40.

Figure 4. Typical types of failure of the adhesive bond between wood and steel. The adhesive used is XEPOX 40. On the left side can be seen the failure of wood in dry conditions, while on the right side the failure between the adhesive and wood or between the adhesive and steel with some presence of corrosion is shown after exposure to water.

stiranja za nekonstrukcijsko uporabo v suhih pogojih sta se obe lepili odlično obnesli, medtem ko pri testiranjih za vlažnejše pogoje nista dosegli zastavljenih vrednosti. Ker standardi za konstrukcijsko lepljenje predvidevajo višjo odpornost lepila na vodo od ugotovljene, nismo mogli nobenega od testiranih lepil opredeliti kot popolnoma primerne za konstrukcijsko lepljenje lesa in jekla.

Tako zaradi višjih povprečnih strižnih trdnosti spoja kot tudi zaradi višje zanesljivosti je bilo kot najboljšo izbrano epoksidno lepilo ERGO. Glede na dobljene rezultate predlagamo, da se pri konstrukcijskem lepljenju lesa in jekla z izbranim lepilom lepilni spoj dodatno ojača z vijaki. Tako bi lepilo zagotovilo želeno togost spoja v normalnih razmerah, v primeru nastanka izrednih klimatskih razmer (prekomerna vlaga ali požar), zaradi katerih bi lahko lepilni spoj začel popuščati, pa bi vijaki prevzeli obremenitev in s tem zagotovili zanesljivost konstrukcijskega spoja.

## 5 POVZETEK

### 5 SUMMARY

A good adhesive bond between wood and steel can result in more rigid connection, compared to one made with screws. The aim of this research was to determine the suitability of selected polyurethane and epoxy adhesives for structural bonding of wood and steel.

We tested four polyurethane adhesives COSMO (PU 100.110, PU 190.110, PU 180.150 and PU 200.281) and two epoxy adhesives ERGO 7420 and XEPOX 40. The quality of the adhesive bond was evaluated by a shear strength test of single-lap specimens (SIST EN 205, 2016) (Figures 1 and 2) followed by various exposure procedures that the specimens were subjected to. The exposures were chosen according to some EN standards for wood adhesives (SIST EN 204, 2016; SIST EN 12765, 2016; SIST EN 15425, 2017) and one earlier study (Mravljak, 2014). Specimens bonded with all the tested adhesives were exposed to three different conditions:

- Standard climate (20/65) with 65 % relative humidity and temperature of 20 °C,
- Humid climate (20/87) with 87 % humidity and temperature of 20 °C and
- Soaking in water at 20 °C for 24 hours.

The adhesives with sufficient results in the first test series were additionally tested also after more demanding exposures in second series:

- Soaking in water at 20 °C for 4 days.
- Cooking in boiling water for 3 hours, followed by cooling down for 2 hours in water at 20 °C.

The goal was to achieve the mean shear strength of the adhesive joint of 10 MPa after testing in a standard climate, and 4 MPa after soaking in water. The results of first test series showed that the studied polyurethane adhesives cannot compete with epoxy adhesives in terms of bonding quality in wood – steel connections (Figure 3), and thus we focused only on epoxy adhesives in the second test series.

Adhesive bonds prepared with both of the studied epoxy adhesives were confirmed to be sufficiently strong (high mean shear strength values) and reliable (high characteristic values = 95 - percentile shear strength values) in dry conditions (Table 1).

After soaking in water, most of the treatment combinations did not achieve the target shear strength (Table 1). In one- and four-day soaking in water (calculated together) ERGO adhesive resulted in a statistically significant ( $p = 0,05$ ) higher shear strength (3,0 MPa) than XEPOX adhesive (2,4 MPa). This difference was even higher after cooking in boiling water (5,1 MPa for ERGO; 1,8 MPa for XEPOX with  $p = 0,001$ ).

An even bigger issue than insufficient mean shear strength was raised by the small characteristic values. These were highly affected by the intrusion of corrosion in some adhesive joints (Figure 4), which resulted in low shear strength ( $< 0,5$  MPa). ERGO adhesive proved to be more resistant to corrosion. Corrosion appeared in each third sample piece bonded with XEPOX adhesive, and in less than each tenth sample piece bonded with ERGO adhesive.

In all the performed tests the epoxy adhesive ERGO 7420 was found to be the best among the tested adhesives for bonding wood and metal. In order to use the selected adhesive in construction applications, we recommend that the adhesive joint should be additionally reinforced with screws. In this manner, the adhesive would provide the desired stiffness of the joint in normal conditions, while the screws would ensure the reliability of the joint in the event of exceptional moisture or fire.

## ZAHVALA

### ACKNOWLEDGEMENTS

Raziskava je bila izvedena v okviru projekta: **TIGR4smart – Trajnostno in inovativno gradbeništvo za pametne stavbe (C3330-16-529003)**. Za pomoč se zahvaljujemo projektnima partnerjema REM d.o.o. in Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo ter študentoma Marku Škamlecu in Juretu Lobniku, ki sta v okviru svojih diplomskih nalog opravila del predstavljenih raziskav.

## VIRI

### REFERENCES

- Alam, P., Ansell, M., P., & Smedley, D. (2009). Mechanical repair of timber beams fractured in flexure using bonded-in reinforcements. *Science direct – Composites*, 40, 95-106.
- Cenci, G. (2005). Risanare a Venezia solo con il legno. *Area legnio*, 20. <http://www.cenci.com/home/images/pdf/AL20.pdf> 6.6.2018
- Metelli, G., Preti, M., & Giuriani, E. (2016). On the delamination phenomenon in the repair of timber beams with steel plates. *Construction and Building Materials*, 102, 1028-1028.
- Mravljak, M. (2014). Vpliv vlažnosti lesa in debeline lepilnega spoja na adhezijo med lesom in jeklom. Doktorska disertacija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, 140 str.
- Park, J-S., Buchanan, A. H., & Lee, J-J. (2006). Fire Performance of Laminated Veneer Lumber (LVL) with Glued-in Steel Rod Connections. *Journal of fire sciences*, 24, 27-46.
- Saražin, J., & Šernek, M. (2017). Strižna trdnost lepilnega spoja med lesom in jeklom. Zbornik. Ljubljana: Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, 39, 219-225.
- 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 preklpom (SIST EN 205:2016).
- SIST (2005). Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe (SIST EN 1995-1-1:2005).
- SIST (2016). Razvrstitev duromernih lepil za les za nekonstrukcijsko uporabo (SIST EN 12765:2016).
- SIST (2017). Lepila – Enokomponentni poliuretan (PUR) za lesene nosilne konstrukcije – Razvrstitev in zahtevane lastnosti (SIST EN 15425:2017).
- Steiger, R., Serrano, E., Stepinac, M., Rajčić, V., O'Neill, C., McPolin, D., & Widmann, R. (2015). Strengthening of timber structures with glued-in rods. *Construction and Building Materials*, 97, 90–105.
- Škamlec, M. (2017). Kakovost poliuretanskega lepilnega spoja med lesom in jeklom. Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, 30 str.
- Trustochowicz, G., Serrano, E., & Steiger, R. (2011). State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods. *Materials and Structures*, 44, 997–1020.
- Verdet, M., Salenikovich, A., Cointe, A., Coureau, J-L., Galimard, P., Toro, W. M., Blanchet, P., & Delisee, C. (2016). Mechanical Performance of Polyurethane and Epoxy Adhesives in Connections with Glued-in Rods at Elevated Temperatures. *BioResources*, 11(4), 8200-8214.