

LASTNOSTI IN KLASIFIKACIJA ADHEZIVOV TER NJIHOVA UPORABA PRI LESU IN STEKLU

PROPERTIES AND CLASSIFICATION OF ADHESIVES AND THEIR USE FOR WOOD AND GLASS

Mateja Držečnik, univ. dipl. inž. grad.

mateja.drzecnik@um.si

red. prof. dr. Miroslav Premrov, univ. dipl. inž. grad.

miroslav.premrov@um.si

red. prof. dr. Andrej Štrukelj, univ. dipl. inž. grad.

andrej.strukelj@um.si

Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo
Smetanova ulica 17, Maribor

Znanstveni članek

UDK 624.011.1.04

Povzetek | Adhezive lahko definiramo kot nekovinsko substanco, ki je sposobna povezovati materiale s pomočjo površinskih vezi (adhezije), ki jih tvorijo tudi notranje vezi (kohezija). Adhezive, ki jih največkrat pojmujejo kar lepila, uporabljamo tako v vsakdanjem življenju kot tudi v industrijske namene. Zgodovina njihove uporabe sega v kameno dobo. V prvem delu članka so predstavljeni karakteristike lepljenega spoja, načini lepljenja in dejavniki, ki vplivajo na njegovo trdnost. Opisani so postopek priprave površine, pomen vlaženja podlage, način spajanja dveh ali več materialov ter koncept površinskih napetosti. Dodatno so opisane sile v povezavi z adhezijo ter pomen energije porušitve spoja. Sledijo še prednosti in slabosti njihove uporabe. Drugi del članka je namenjen klasifikaciji adhezivov, ki ni enotna. Na koncu se osredotočimo na adhezive, ki se uporabljajo pri lepljenju dveh gradbenih materialov, in sicer lesa in stekla ter njune kombinacije.

Ključne besede: adheziv, lepljeni spoj, les, steklo

Summary | Adhesives are defined as nonmetallic substances capable of joining materials by surface bonding (adhesion), the bond itself possessing adequate internal strength (cohesion). The most commonly term used for adhesives is glue. The history of their use goes back to the Stone Age. In the first part of the paper, the characteristics of bonding as a joining process are presented. Factors that influence adhesive strength, process of surface preparation, humidity of the substrate, method of joining two or more materials and the concept of surface tension are described. In addition, adhesive forces inside the adhesive layer and advantages and disadvantages of bonding are interpreted. The second part deals with the classification of adhesives. In the end, we focus on the adhesives used in bonding two building materials, timber and glass, and their combination.

Key words: adhesive, bonded joint, timber, glass

1 • ZGODOVINA ADHEZIVOV

Tehnologija uporabe adhezivov je ena izmed najstarejših znanih tehnologij v zgodovini človeštva. Najstarejši dokazi o uporabi adhezivov segajo v kameno dobo, kjer so uporabljali mineralne smole ali smole dreves (Gierenz, 2001). V Knossosu na Kreti so raziskovalci odkrili poslikane stene z apnom, ki je bilo vezivo za kredo, ki je vsebovala železove in bakrene delce. Prebivalci, natančneje lesarji iz grškega mesta Tebe so izumili postopek lepljenja manjših tanjših furnirnih kosov lesa v večje kose, tako da so uporabili lepila iz jajc. Tudi Egipčani so

uprabljali lepila iz jajc in drevesnih smol. Izdelava prvotnega papirusa je potekala tako, da so lesena trsja narezali na tanke kose in jih položili enega zraven drugega ter jih udarjali, da so se sploščili. Potem so jih premazali s pasto iz moke, da so se zlepi in na soncu posušili. Tudi Sveto pismo opisuje uporabo veziva. Za gradnjo babilonskega stolpa naj bi uporabil bitumen (Skeist, 1900). Uporabo adheziva za tesnjenje Noetove barke opisuje Prva Mojzesova knjiga. Ne opiše pa vrsto tesnilnega sredstva. Rimski pisec Pinij je v svojem najboljšežnejšem delu Naravoslovje 1

opisal postopek nanosa mešanice borove smole in čebeljega voska na ladje rimske pomorske flote. Tudi stari Kitajci so uporabljali smolo, pridobljeno večinoma iz omel (Gierenz, 2001).

Razvoj kemije iz zgodnjih začetkov 20. stoletja je prinesel velik napredek pri razvoju in uporabi adhezivov. Pojavile so se fenolne smole (ca. 1900), melaminske smole in smole iz uree (ca. 1930), polimerne disperzijske in epoksisole (1938) ter cinoakrilati (1957), ki so začeli nadomeščati klasične naravne adhezive. V zadnjih desetletjih zaznavamo množično uporabo adhezivov, narejenih z uporabo modernih tehnologij, ki so razvojno najbolj napredni sistemi (Gierenz, 2001).

2 • OSNOVNE KARAKTERISTIKE LEPLJENEGA SPOJA IN NAČINI SPAJANJA

Lepljeni spoji so edini proces povezovanja, ki ga najdemo v naravi. Čebele za izgradnjo svojega satovja izločajo lepljive izločke, ki povežejo lesena vlakna v trdno strukturo. Pajkovo mrežo sestavljajo beljakovine, obogatene z alaninom, serinom, glicinom. Pri prehodu skozi predilne cevi se strdijo in spremenijo v nit. Ptice lastovnice svoja gnezda zgradijo tako, da koščke zemlje in ostalih organskih

in natezno trdnost. Pod pojmom substrat pa razumemo material, ki ga lepimo. Ko je spojen, ga imenujemo adherent. Prostor med adhezivom in adherentom je medfazno območje, ki ima drugačne kemijske in fizikalne lastnosti kot večina adheziva ali adherenta. To območje predstavlja odločilen faktor za določitev lastnosti in kvalitete lepljenega spoja. Mejna plast je mejna kontaktna ravnina med

kemijskih reakcij, ohlajanja ali s pomočjo oddajanja vode oz. topila. Izjema so adhezivi, ki so občutljivi za tlak, in adhezivi, ki ostanejo v tekočem agregatnem stanju. Z vzpostavitev kontakta se začnejo tvoriti Van der Waalsove sile ter seveda tudi druge medmolekularne kemijske vezi, ki so odvisne predvsem od kemijske sestave adheziva in substrata. Pred procesom strjevanja lahko pride do penetracije adheziva v substrat (mehansko sidranje), kar pripomore k trdnosti adhezivnega spoja. Povezovanje molekul polimerov v adhezivu in substratu pa je rezultat molekularne meddifuzije po površini.

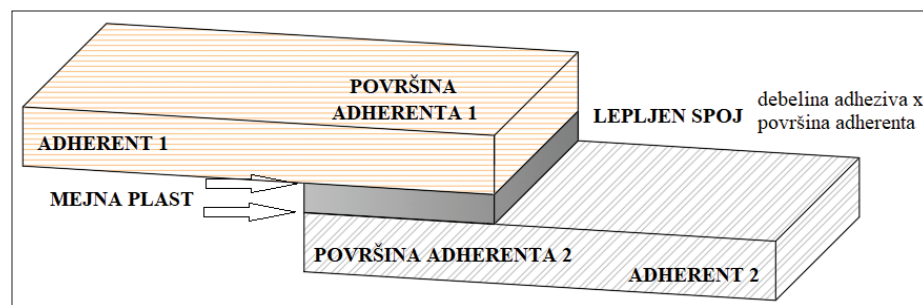
Na trdnost spoja vplivajo naslednji dejavniki:

1. Priprava površine

To zajema predhodno pripravo adherentov, na katere nanašamo adhezive. Če hočemo zagotoviti dobro adhezijo, moramo površino očistiti. Navodila pri vseh proizvajalcih so enaka. Površine morajo biti suhe in na njih ne sme biti prahu ali maščob. Prav tako na njej ne sme biti ostankov barv in drugih premazov ter adhezivov. To dosežemo s pomočjo čistil oziroma prednamazov (primerjev). Ker večinoma nimamo možnosti lepljenja izvajati v idealnih laboratorijskih pogojih, je treba lepljeni spoj izvesti neposredno po tem, ko sta bili površini, ki ju nameravamo zlepi, očisti, da ponovno ne pride do njune kontaminacije.

2. Vlaženje podlage

Po čiščenju adherenta nanesemo adheziv. Da zagotovimo vlaženje po celotni površini, je treba adheziv nanesti na substrat v tekoči obliki. S tem navlažimo celotno površino in ne puščamo praznih prostorov, tudi če je površina groba. V odvisnosti od viskoznosti in vlažnosti adherenta tekoči adheziv tvori



Slika 1 • Shematski prikaz lepljenega spoja.

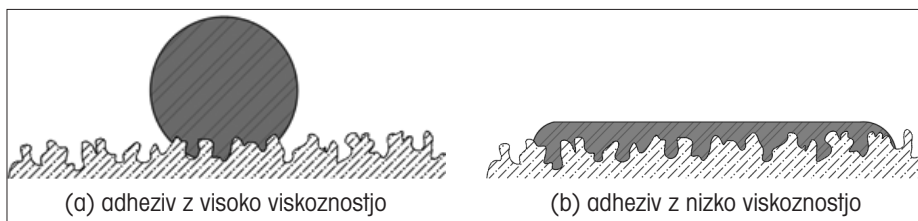
snovi prilepijo na zunanje zidovje stavb. Tudi človek proizvaja adhezivno snov v okviru komponente krvi, znano pod imenom fibrinogen, ki se s kemično reakcijo spremeni v fibrin, ki omogoča celjenje ran.

Gierenz in Karmann (Gierenz, 2001) sta definirala adhezive kot nekovinsko substanco, ki je sposobna povezovati materiale s pomočjo površinskih vezi (adhezije), ki jih tvorijo tudi notranje vezi (kohezija). Najdemo jih tudi pod pojmi, kot so lepila, paste, cementi, gume, povezovalni agenti in druga sredstva za spajanje. Navadno imajo adhezivi visoko strižno

površinami materialov. Lepljeni spoj tako vsebuje najmanj pet členov (slika 1): adherent 1, površina adherenta 1, adheziv, površina adherenta 2 in adherent 2.

2.1 Trdnost lepljenega spoja

Adheziv, ki ga nanesemo na površino, ima dve nalogi: najprej mora primerno navlažiti površino, kar pomeni, da tvori kontaktni kot blizu ničle, nato pa se mora strditi v kohezivno trdno telo. Vlaženje zajema kontakt med molekulami adheziva ter atomi in molekulami površine. Strjevanje lahko nastopi s pomočjo



Slika 2 • Oblika adheziva na površini adherenta v odvisnosti od njegove viskoznosti.

različno obliko kapljice. Adhezivi z visoko viskoznostjo so prikazani na sliki 2a, z nizko viskoznostjo pa na sliki 2b.

3. Koncept površinske napetosti

Na vlaženje podlage pa poleg viskoznosti vpliva tudi t . i. *površinska napetost*, ki se izraža kot naklonski kot α med tekočim adhezivom in adherentom. Na sliki 3 so prikazane oblike naklonskih kotov. Na splošno povedano: manjši ko je kot, boljše je vlaženje. Dobro vlaženje dobimo pri kotih α , ki so manjši od 30° . Pri sferični obliki, ki nastopi pri kotih okoli 180° (kapljice živega srebra), ni nobenega vlaženja (Habenicht, 2009).

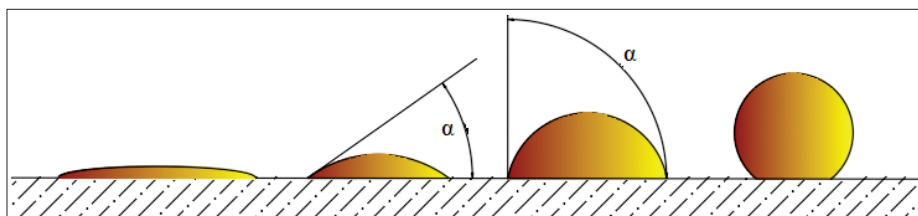
- s pomočjo projekcije iz mikroskopa in meritvijo višine in polmera kapljice,
- z digitalno analizo slike s pomočjo računalnika in primerne programske opreme.

Zvezo med napetostmi na sliki 4 lahko zapišemo v obliki Youngove enačbe, ki se glasi:

$$\gamma_{LV} \cdot \cos \theta = \gamma_{SV} - \gamma_{SL}, \quad (1)$$

pri čemer je:

- θ kontaktni kot
- γ_{LV} napetost na vmesni ploskvi med tekočino in zračno vlago
- γ_{SV} napetost na vmesni ploskvi med trdno snovjo in zračno vlago



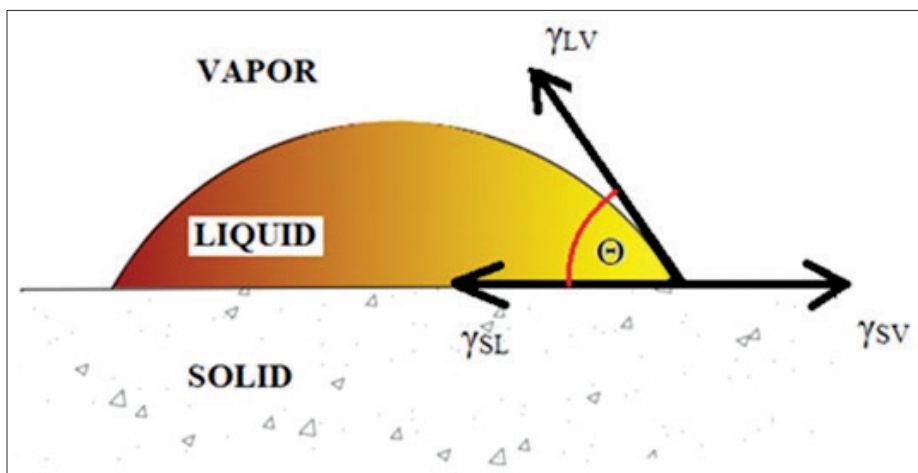
Slika 3 • Shematično prikazane oblike naklonskih kotov in stopnje vlaženja.

Merska metoda kontaktnih kotov poteka tako, da kapljico tekočine kanemo na trdno in ravno površino ter opravljamo meritev kota θ med površino trdne snovi in tekočine (slika 4). To lahko počnemo (Cognard, 2006):

- neposredno s pomočjo mikroskopa in gonimetra,

- γ_{SL} napetost na vmesni ploskvi med trdno snovjo in tekočino

V notranjosti tekočine delujejo iz vseh smeri enake privlačne sile na molekule vode (slika 5). Na površini pa te sile niso enake. Zato obstaja sila F , ki ima prijemališče na sredini kaplje in hoče pritegniti molekule vode v stran



Slika 4 • Kontaktni kot med tekočim adhezivom in površino adherenta.

od površine proti notranjosti, posledično pa zmanjšuje svojo površino, ki se na koncu odraža v sferični obliki, saj takšna oblika omogoča najmanjše razmerje med volumnom in površino (Habenicht, 2009).

Adhezijske in kohezijske sile lahko izmerimo kot silo, ki je potrebna za adhezijsko oz. kohezijsko porušitev. Ta sila je odvisna od razdalje in od sil med molekulami in jo lahko označimo z γ , ki pomeni površinsko energijo (Petrie, 2000). Površinska energija je z nape-
tostjo na vmesni ploskvi med trdno snovjo in zračno vlago povezana z enačbo:

$$\gamma_{SV} = \gamma - \pi_e, \quad (2)$$

pri čemer je γ površinska energija, π_e pa je ravnovesni pritisk. Zismanov pristop (Zisman, 1962) določanja površinske energije trdnih snovi predlaga, da lahko kritično površinsko napetost γ_c določimo z vrsto meritev kontaktnih kotov med tekočinami z znanimi površinskimi napetostmi ter površinami snovi, ki nas zanimajo. Kritično površinsko napetost dobimo kot presečišče med ekstrapolirano ravno linijo vrednosti $\cos \theta$ ter horizontalno linijo $\cos \theta = 1$. Ta presek predstavlja točko, kjer je kontaktni kot enak 0° . Vrednosti površinskih napetosti za različne trdne snovi in tekočine so podane v literaturi (Petrie, 2000).

Površinska energija tekočine je kar njena površinska napetost γ_{LV} , saj sta numerično identični. Tudi trde snovi, kot so kovine, stekla in plastike se soočajo s pojavom površinskih napetosti, česar pa zaradi njihovega trdnega agregatnega stanja vidno ne moremo zaznati. Prednost adhezivov je torej tudi v povezovanju materialov z različnimi površinskimi napetostmi. Po zakonih termodinamike je razlika med površinsko napetostjo adheziva in adherenta odločilna za vpojnost sistema (Habenicht, 2009).

Enota za površinsko energijo je: mJ/m^2

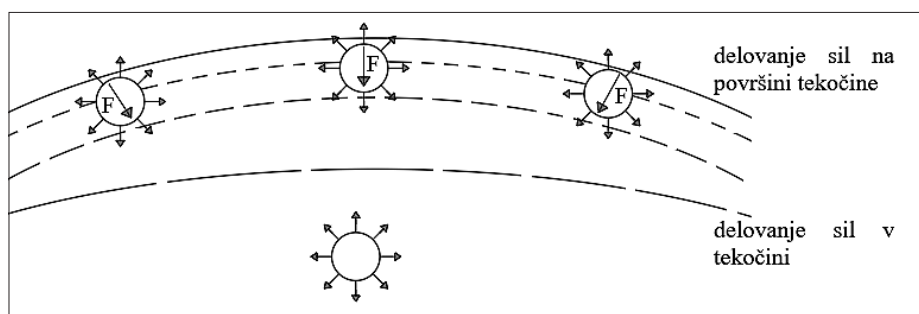
Enota za površinsko napetost je: dina/cm ali N/m ($1 \text{ dina/cm} = 1 \times 10^{-3} \text{ N/m}$)

Površinske napetosti nekaterih materialov (Petrie, 2000):

- kovine 1000–3000 mN/m
- steklo 250–350 mN/m
- voda 72,8 mN/m
- plastika 20–60 mN/m
- adhezivi 30–50 mN/m

4. Sile v povezavi z adhezijo

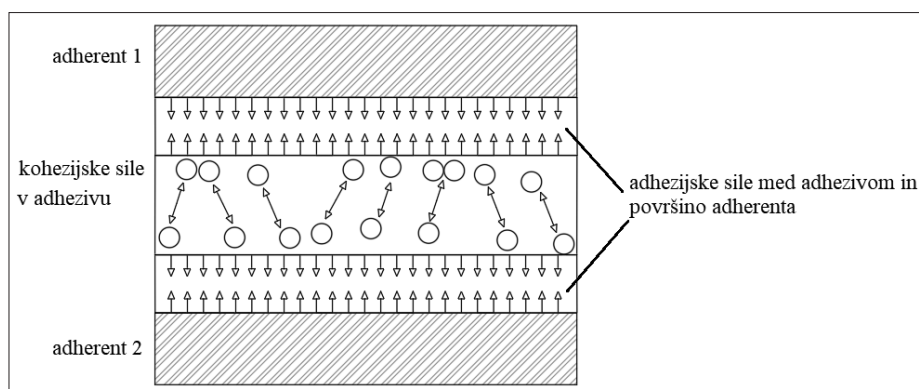
Razvoj adhezivov je povezan z možnostjo spajanja enakih ali različnih materialov, katerih površina, gledano pod mikroskopom, praviloma nikoli ni povsem gladka. Adhezivi so sestavljeni iz osnovnih materialov, ki jim



Slika 5 • Površinske napetosti tekočin.

pravimo veziva. To so navadno dolge verige polimerov z optimalnimi trdnostnimi lastnostmi, ki zagotavljajo adhezivnost (adhezijo) in

Iz enačbe 3 lahko vidimo, da je praktična adhezija vsota dela adhezije in funkcije, ki opisuje mehanizme disipacije znotraj adhezivne



Slika 6 • Adhezijske in kohezijske sile v lepljenem spoju.

odpornost (kohezijo). Adhezijske sile povezujejo dva materiala, ki sta na skupni površini. Kohezijske sile pa držijo skupaj sosednje molekule istega materiala – adheziva in substrata, kar je shematsko prikazano na sliki 6. Delujejo pri vseh tekočih in trdnih substancah. Močnejše ko so kohezijske sile, večja je stabilnost materiala.

Za dobro razumevanje adhezivov je treba poznati dogajanje med procesom spajanja, ki je posledica kemijskih vezi. Pogoji, da bo vez med adhezivom in adherentom trajna, so adhezijske sile, ki jim pravimo tudi medatomске ali medmolekularne sile in lahko delujejo na razdalji velikostnega razreda 10^5 nm (Bikerman, 1961). Adhezijske sile so torej najučinkovitejše, ko je površina adherenta pred nanosom adheziva čista.

5. Energija porušitve spoja

Energijo porušitve spoja delimo na dva dela, in sicer na reverzibilno delo adhezije ter na ireverzibilno delo adhezijske deformacije. Tukaj se osredotočamo predvsem na razmerje dela adhezije (W_A) in praktično oz. izmerjeno adhezijo.

Praktična adhezija = $W_A + f(W_A) \cdot \zeta$ (3)

Če neki material natežno obremenimo z dovolj veliko silo, se bo material porušil in dobimo nove površine. V primeru krhkosti materiala se energija disipira le v tvorbo dveh novih površin. Ob predpostavki, da sta oba kosa materiala iste sestave, lahko napišemo enačbo za delo kohezije W_C (Petrie, 2000):

$$W_C = 2 \cdot \gamma \quad (4)$$

Podobno lahko zapišemo enačbo za delo adhezije kot:

$$W_A = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (5)$$

ali

$$W_A = \gamma_{LV} + \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (6)$$

To je Duprejeva enačba in predstavlja delo adhezije.

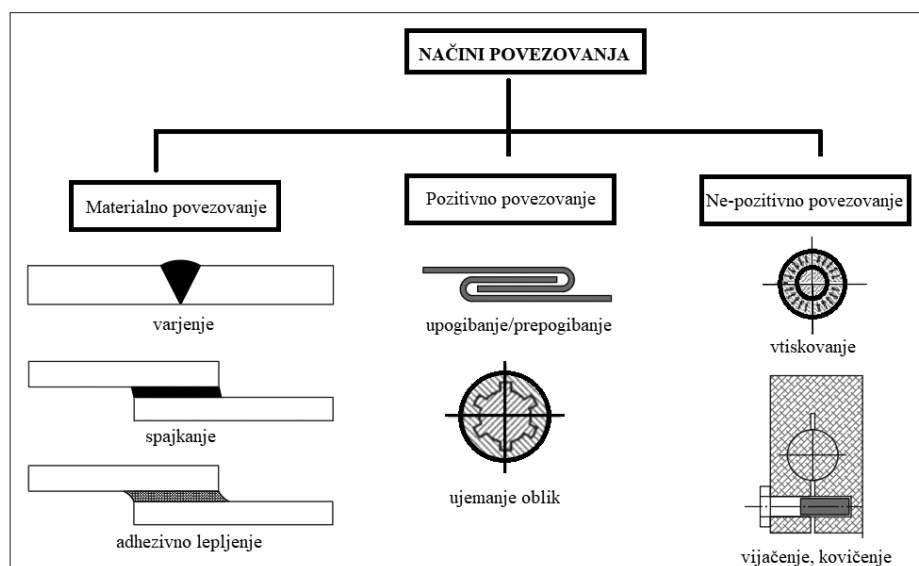
V enačbi za delo adhezije je material 1 adheziv, material 2 pa adherent. Porabljena energija je seštevek površinskih energij γ_1 in γ_2 , γ_{12} pa je med ploskovna energija zaradi medmolekularnih sil dveh materialov v kontaktu. Ob združitvi Youngove (1) in Duprejeve (6) enačbe dobimo Young-Duprejevo enačbo, ki se glasi:

$$W_A = \gamma_{LV}(1 + \cos \theta) \quad (7)$$

Sedaj lahko enostavneje izračunamo W_A s pomočjo kontaktnega kota in napetosti na vmesni ploskvi med tekočino in zračno vlago. Ob idealnem močenju podlage sledi, da je $\cos \theta = 1$ in:

$$W_A = 2 \cdot \gamma_{LV} = W_C \quad (8)$$

oziroma delo adhezije enako delu kohezije. Iz tega sledi, da so v tem trenutku močnejše sile med tekočino in substratom kot pa sile med molekulami tekočine. Adhezija gre proti nič z večanjem naklonskega kota θ nad 90° .



Slika 7 • Načini povezovanja.

Iz zapisanega Petrie (Petrie, 2000) podaja naslednje zaključke, ki so lahko v veliko pomoč uporabnikom lepil in tesnilnih mas:

(1) Delovanje oprijema je največje, ko je kontaktni kot enak 0 stopinj, torej ko se tekočina popolnoma razširi na površino trdne snovi. Ta pogoj pomeni, da obstajajo močnejše sile med molekulami tekočine in substrata kot med samimi molekulami tekočine.

(2) Adhezija se približuje ničli, ko se kontaktni kot večja nad 90 stopinj.

(3) V pogojih popolnega vlaženja površine s tekočino velja (kjer je γ_{LV} definiran kot površinska medploskovna energija):

$$W_A = 2\gamma_{LV} \quad (9)$$

ker je $W_A = W_C$.

2.2 Načini povezovanja materialov

Načini povezovanja materialov so različni. Habenicht (Habenicht, 2009) je povezovanje razdelil v tri večje skupine (slika 7):

- Materialno povezovanje; kamor sodijo varjenje, spajkanje in adhezivno lepljenje.

– Pozitivno povezovanje; kamor sodijo upogibanje in prepogibanje ter ujemanje oblik.

– Nepozitivno povezovanje; kamor sodijo vtiskovanje, vijačenje, vpenjanje, kovičenje.

mizaciji trdnosti in korozijske odpornosti, kar se odraža v avtomobilski industriji.

- Adhezivna plast omogoča električno izolativnost kondenzatorjev, nudi pa tudi zaščito – bariero pred vstopom vlage, kar se še posebno odraža pri proizvodnji oken.

3.2 Slabosti

Poleg prednosti so opredeljene tudi slabosti:

- Omejena je toplotna odpornost adhezivov. Glede na osnovne materialne karakteristike se toplotna odpornost adhezivov giblje med 120 ° in 300 °C.
- Površina adheziva in njegove vezi se lahko poškodujejo zaradi zunanjih vplivov, kot sta npr. vlaga, UV-sevanje, kar vpliva na trdnost kompozita.
- V večini primerov, razen redkih izjem, je potrebna predhodna nega adherenta oz. priprava površine, na katero nanašamo adheziv. Upoštevati pa je treba še čas vezanja adheziva in priprave temu tudi prilagoditi, kar je velikega pomena predvsem v masovni proizvodnji.
- Treba je upoštevati tudi okoljevarstven vidik in odgovoriti na vprašanje recikliranja, kar pa ni vedno mogoče.

2006), (Habenicht, 2009), (Gierenz, 2001), (Shields, 1984)).

3 • PREDNOSTI IN SLABOSTI ADHEZIVOV

3.1 Prednosti

Raziskovalci, kot so Gierenz in Karmann, Habenicht, Skeist in drugi, so podali prednosti adhezivov, ki jih lahko strnemo v naslednje alineje:

- Adhezivno lepljenje omogoča spajanje materialov, ki imajo zelo različne fizikalne, kemijske in mehanske lastnosti. To pride še posebej do izraza, ko povezujemo materiale, ki imajo izrazito različne koeficiente toplotnega raztezka.
- Adhezivni spoji so neprimerno hitrejši od drugih načinov spajanja dveh materialov in v nemalo primerih tudi cenejši.
- Ena večjih prednosti je, da materialov, ki jih spajamo, ne oslabimo z odprtinami kot v primeru vijačenja ali kovičenja. Tako je prenos obremenitev vezan na celotno površino, in ne točkovno, čemur pravimo homogeni prenos napetosti.
- Ta enakomerna porazdelitev napetosti pomeni tudi prihranek pri materialu, saj lah-

ko posledično uporabimo manjše preseke, kar pomeni lažjo konstrukcijo in močnejši spoj. To se posebej izkaže za pomembno pri masovnih proizvodnjah materialov. Posledično je torej konstrukcija lažja in spoj močnejši (v primerjavi z mehanskimi veznimi sredstvi), manjša pa je tudi možnost porušitve zaradi utrujanja.

- Adherent v veliki večini ni izpostavljen visokim temperaturam, ki nastopijo pri varjenju in spajkanju, saj lepljenje opravimo pri sobni temperaturi in s tem povezujemo materiale, ki so občutljivi za visoke temperature, kot sta npr. les in PVC. Izjema nastane v posebnih primerih, ko uporabimo adhezive, ki se vežejo pri povišani temperaturi.
- Z adhezivi lahko lepimo zelo tanke materiale (<500 µm), kar je pomembno v letalski industriji in v industriji, ki se ukvarja s pakiranjem.
- Kombinacija »pozitivnega« in »negativnega« povezovanja je pomembna pri opti-

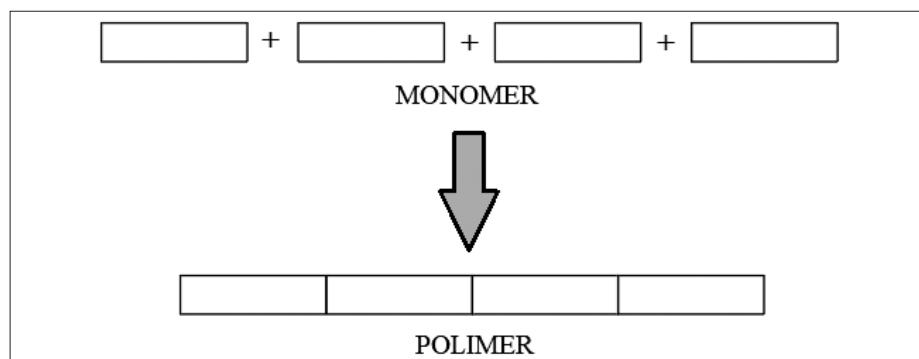
4 • STRUKTURA IN KLASIFIKACIJA ADHEZIVOV

4.1 Struktura adhezivov

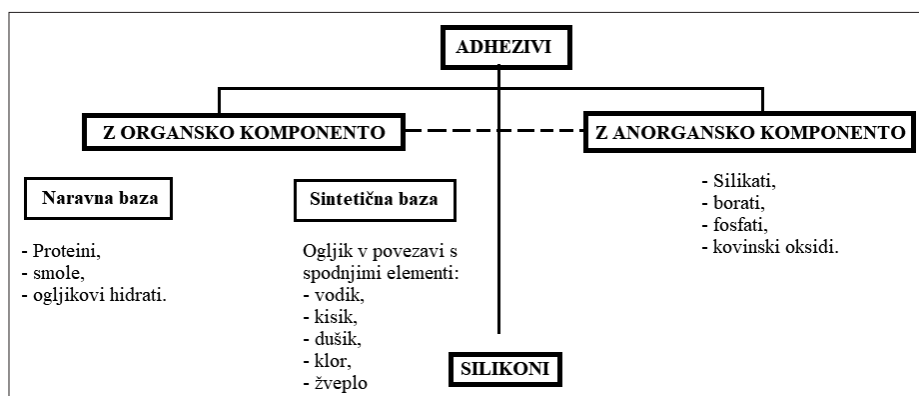
Adhezivi obstajajo v različnih oblikah in variacijah, zato je njihovo razvrščanje glede na posamezno lastnost težka naloga. Strukturno adhezive ločimo glede na povezave molekul, ki so lahko v obliki monomera, torej so molekule enojna povezava, ali v obliki polimera, ki je sestavljen iz več monomerov (slika 8) (Habenicht, 2009).

4.2 Klasifikacija adhezivov

V nadaljevanju podajamo klasifikacije, ki jih je mogoče najti v različnih literaturah ((Cognard,



Slika 8 • Shematski prikaz monomera in polimera.



Slika 9 • Klasifikacija adhezivov glede na kemično sestavo (Habenicht, 2009).

4.2.1 Klasifikacija glede na kemično sestavo adhezivov

Glede na kemično sestavo ločimo dve vrsti struktur adhezivov, ki imajo v osnovi organsko ali anorgansko komponento. Pri organski komponenti je osnovni kemični gradnik ogljik, ki se s svojimi vezmi lahko spaja sam s sabo in tudi z drugimi kemičnimi elementi. Te dodatno razdelimo na (slika 9) (Habenicht, 2009):

- *Komponente iz naravne baze* (proteini, smole, ogljikovi hidrati), kamor prištevamo silikate, borate, fosfate in kovinske okside.
- *Komponente iz sintetičnih baz* (ogljik v povezavi z vodikom, kisikom, dušikom, klorom in žveplom).

Posebno pozornost pa je treba nameniti *silikonom*, saj vsebujejo tako organske kot anorganske komponente.

4.2.2 Klasifikacija glede na način strjevanja adheziva

Klasifikacija glede na način strjevanja je narejena tako, da olajša izbiro za določen material, (Habenicht, 2009), (Gierenz, 2001)). Ločimo:

4.2.2.1 Adhezivi, ki se spajajo s pomočjo kemičnih reakcij – reactive adhesives

V tem primeru se večinoma tekoči adheziv, sestavljen iz monomera, nanese na adherent, kjer se sprosti kemična reakcija in adheziv preide iz tekočega v trdno stanje. Ta čas prehoda imenujemo strjevanje. Ločimo eno- in dvokomponentne adhezive.

Na podlagi termomehanskih lastnosti adhezivne plasti lahko te t. i. reaktivne adhezive delimo dodatno še nadalje:

- *termoseti ali duromeri*, kjer se adheziv segreje pred samim lepljenjem. Sem spadajo predvsem epoksidne smole, fenolne smole, poliuretani in anaerobni adhezivi;
- *termoplasti ali plastomeri*, kjer se adhezivni film tvori s procesom segrevanja. Sem spadajo cianoakrilati in metaakrilati ter nekateri poliuretani;
- *elastomeri* imajo izrazito nizke module elastičnosti in visoke porušne napetosti. Sem sodijo silikoni in nekateri poliuretani.

4.2.2.2 Adhezivi, ki se ne spajajo s pomočjo kemičnih reakcij – physically setting adhesives

Proces prehoda iz monomera v polimer se lahko dogaja tudi pred nanosom adheziva. Zato je potrebna likvifikacija – utekočinjenje, ki lahko poteka na več načinov:

- *solvent-based adhesives*: polimerni adhezivi, ki se topijo s pomočjo organskih topil,
- *dispersion adhesives* – voda predstavlja osrednji medij za distribucijo polimera,
- *hot-melt adhesives* – polimeri se topijo s pomočjo višanja temperature, kjer te vezi razpadejo in po ohlajanju ostanejo ločene,
- *pressure-sensitive adhesives* – kot samo ime pove, so občutljivi za višanje tlaka.

4.2.3 Klasifikacija glede na reakcijo adhezivov (Gierenz, 2001):

- kemijska reakcija,
- reakcija z izgubo topila in vode,
- strjevanje s topljenjem,
- topilni smolnati adhezivi.

4.2.4 Klasifikacija glede na kemijsko sestavo adhezivov (Gierenz, 2001):

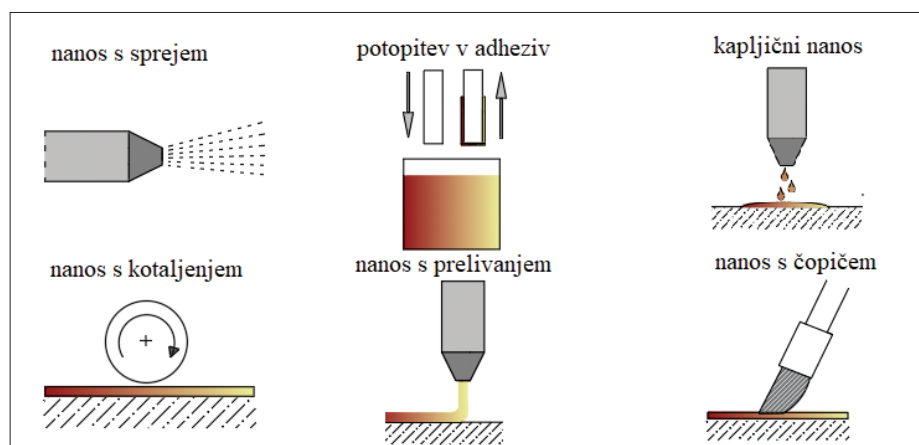
- termoplastični adhezivi,
- termosetni adhezivi,
- elastomerni adhezivi,
- hibridni adhezivi.

4.2.5 Klasifikacija glede na fizično obliko adhezivov (Gierenz, 2001):

- paste in tekočine,
- adhezivi na bazi topil,
- adhezivi na vodni bazi,
- adhezivi v trdni obliki (filmi, trakovi, praški ...).

5 • APLIKACIJA ADHEZIVOV

Nanos oz. aplikacija adhezivov je odvisna od več dejavnikov. Predvsem je odvisna od vrste samega adheziva, saj lahko gre za eno- ali dvokomponentno različico. Pomembni pri tem so razmerje mešanice, viskoznost adheziva ter občutljivost za vlago in temperaturo. Upoštevati moramo tudi količino nanosa in posledično čas vezanja. Aplikacija nanosa je lahko točkovna, linijska ali površinska. Pri tem pa ne smemo pozabiti tudi na natančnost pri nanašanju adheziva ob upoštevanju povezovalnih površin. Načine nanosa prikazuje slika 10.





Slika 10 • Metode nanašanja adheziva.

6 • LEPLJENJE LESA IN STEKLA

6.1 Povezava les-les

Les je naraven anizotropni material s prisotnostjo napak na površini. Prav zaradi tega in zaradi poroznosti ter prisotnosti vlage je treba posebno pozornost nameniti nanosu adheziva in postopku strjevanja le-tega. Danes za povezave z lesom uporabljamo predvsem sintetične adhezive. Tradicionalna povezava je temeljila na adhezivih iz naravnega materiala (gluten in produkti iz kazeina), ki pa se danes uporablja samo še za izdelavo glasbil (Skeist, 1990). Moramo pa biti pozorni na nekatere lastnosti uporabljenih adhezivov:

- pri disperzijskih adhezivih pretirana prisotnost vlage podaljša čas vezanja adheziva;
- pri kondenzacijskih adhezivih, ki se strjujejo brez prisotnosti vode, se lahko pojavi krčenje;
- vročelepljeni adhezivi, kjer lahko pri visoki vlagi in temperaturi pride do pojava vodne pare, ki oslabi adhezivne sile.

Praktična uporaba je pokazala, da je optimalna vlaga lesa med 8 in 10%.

Spodaj so našteje skupine določenih adhezivov, ki se priporočajo pri uporabi povezave les-les (Gierenz, 2001):

Poli(vinil acetatna) emulzija – imenujemo jo tudi »belo lepilo« in je v množični uporabi pri vsakdanjih spojih z lesom. Če želimo večjo odpornost proti vlagi, obstaja tudi v dvokomponentni različici.

Pohištena lepila – uporabljajo se bolj za dekorativne namene. So odporna proti visoki temperaturi in vsebujejo emulzijo etilen-vinil acetata.

Vroča lepila se uporabljajo v večini za industrijske namene, za lepljenje furnirnih plošč, parketov, laminatov. Z dodatki izboljšamo njihovo odpornost proti vlagi, temperaturi in celo izboljšamo njihovo nosilnost in trdnost.

Urea-formaldehidne smole – uporabljajo se za lepljenje vezanih plošč. Te smole se odlično obnesejo v notranjosti, kjer so pogoji bolj ali manj konstantni, za zunanjo aplikacijo pa jih ni priporočljivo uporabljati.

Melaminske smole so zelo pomembne na področju, kjer je zahtevana odpornost proti vodi lepljenega spoja.

Melamin-formaldehidne smole – v večini se uporabljajo za lepljenje parketa in laminata ter ostalih vezanih plošč.

Fenolne smole in lepila so cenejša varianta za lepljenje vezanih plošč. Njihov rok uporabnosti je samo 6 mesecev. Stik, ki temelji na fenolni smoli, je visokokvaliteten in vodoodporen. Ta adheziv še posebej priporočajo za lepljenje lesa s kovinami.

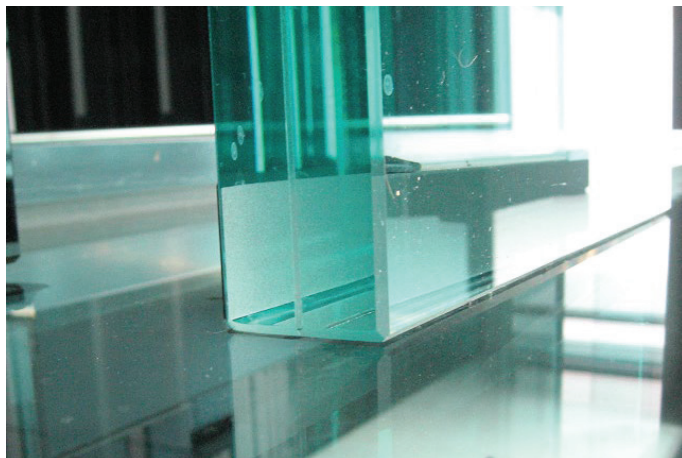
Rezorcinolne smole in lepila – to so še posebej močni spoji, ki so vodoodporni in odporni proti maščobi, oljem in topilom.

Kontaktne adhezive – to so adhezivi na osnovi polikloridne gume, ki se uporabljajo samo za popravila lesnih proizvodov. Ta adheziv je nadomestek polivinil-acetatnih emulzij. Prednosti teh adhezivov v primerjavi z ostalimi je v hitrem vezanju, brez sofisticiranih naprav, ki izvajajo pritisk na adherent.

Poliuretan je nova generacija adhezivov, ki se uporablja pri lesenih oblogah in strižnih stenah. Z dodanim adhezivnim spojem med steklenim panelom in lesenim okvirjem dosežemo sovprežnost in posledično lahko dobimo tudi kompozit, ki je nosilen v lastni ravnini. Poliuretan izkazuje izjemne karakteristike pri nosilnosti spoja in odpornosti proti zunanjim vplivom.

6.1 Povezava steklo-steklo

Steklo v povezavi z drugimi materiali postaja vedno bolj prepoznavni konstrukcijski material v sodobnem gradbeništvu, saj omogoča



Slika 11 • Izolacijsko steklo – uporabljen adheziv silikon; lepljeno lamelirano steklo, ki je v uporabi kot konstrukcijsko steklo – adheziv PVB-folija.

bivalno ugodje, ki mu doda tudi višjo estetsko vrednost. V gradbeništvu je bila v preteklosti uporaba stekla omejena na okenske in fasadne elemente, sodobni objekti v svetu pa že uporabljajo steklo kot samostojni nosilni fasadni ali konstrukcijski element. Steklo odlikuje tudi njegova odpornost proti skoraj vsem kemikalijam ter možnost popolne reciklaže. V gradbeništvu je v uporabi predvsem natrij-kalcijevo silikatno steklo. Med konstrukcijskim steklom pa ločimo:

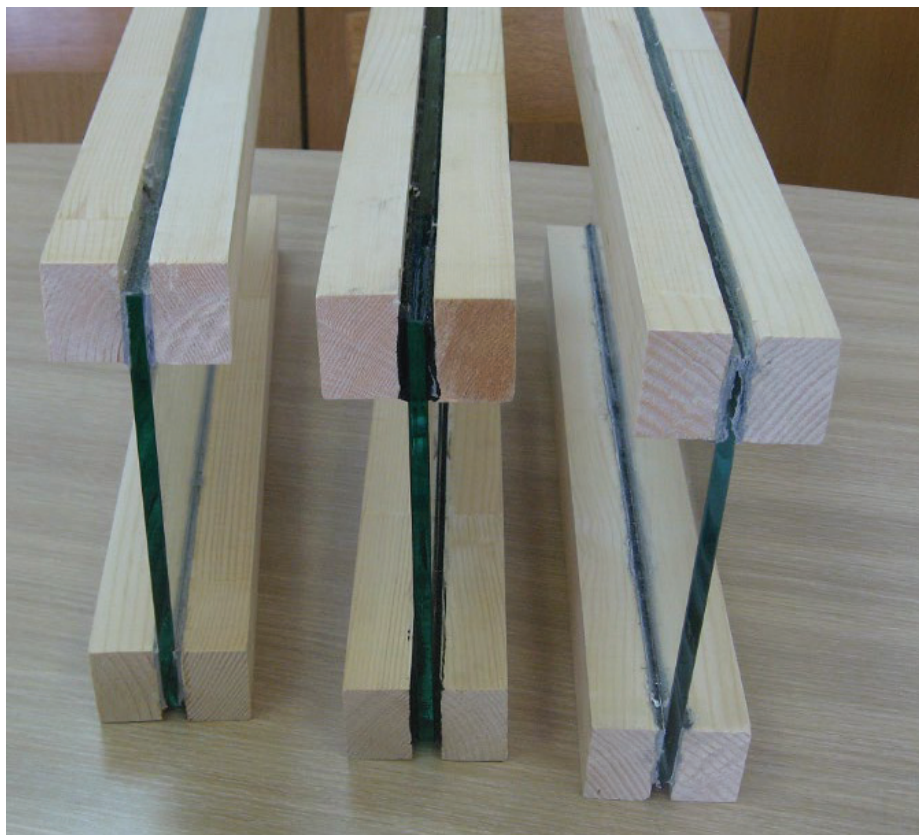
- navadno plosko steklo,
- kaljeno steklo,
- kemijsko ojačano steklo,
- lepljeno lamelirano steklo.

Steklo po mikrostrukturi uvrščamo med amorfne keramike, ki ima vse lastnosti trdne snovi. Karakteristična lastnost stekla je v lahki povezavi. Steklne plošče se lahko zaradi vlage med seboj zlepijo tako, da jih komaj uspemo ločiti. Zasluzne za ta pojav so molekule materialov s svojo kohezijo. Zato je pomembna velika pozornost pri pripravi površine, ki jo skrbno obrišemo in razmastimo z organskimi topili (alkohol, aceton). Priporočeno je, da površino pred nanosom adheziva primerno osušimo.

Povezave mineralnih struktur, kot je steklo, zahtevajo adhezive, ki se ne krčijo ali se zelo malo ter izkazujejo visoko polarnost. Poleg tega sta pomembni še transparentnost adheziva in UV-odpornost. V izoginitev notranjim napetostim uporabljamo adhezive, ki se nanašajo pri sobni temperaturi. Uporabljajo se predvsem polarni polimeri, kot so npr. epoksidi, ter polimetakrilati v dvokomponentni obliki. Za velike površine, za okna, avtomobilska stekla in neprebojna stekla se uporablja lamelirano steklo, ki ima med sloji stekla PVB-folijo, ki poskrbi, da se steklo med razbitjem ne razleti (slika 11b). Za industrijsko uporabo pa se večinoma uporabljajo silikonski adhezivi (slika 11a).

6.3 Povezava les-steklo

Kombiniranje tako različnih materialov, kot sta les in steklo, predstavlja svojevrsten izziv



Slika 12 • Povezava les-steklo, adhezivi: epoksi, silikon, akrilat.

(slika 12). Pri spoju je treba doseči ustrezno razmerje med nosilnostjo in duktilnostjo. Poleg pravilne izbire adheziva, načina spajanja sta pomembni tudi priprava in nega površine. Ena izmed glavnih prednosti lepljenega spoja je, da z njim dosežemo enakomerno napetost po celotni dolžini spoja v nasprotju z visokimi lokalnimi napetostmi pri žebeljanih ali vijačnih zvezah. Cruz in Pequeno ((Cruz, 2008a), (Cruz, 2008b)) sta portugalska raziskovalca, ki sta ena izmed prvih preiskovala adhezive, ki povezujejo leseno-steklene kompozite. Razdelila sta jih v tri skupine, in sicer:

- togi adhezivi – izredno visoka trdnost in togost (npr. akrilat, epoksi),
- srednje togi adhezivi – uravnotežena trdnost in elastičnost (npr. poliuretan),

- elastični adhezivi – izredna elastičnost in nizka trdnost (npr. silikon in nekateri poliuretani).

V preglednici 1 so prikazane materialne karakteristike za steklo in les. Vidimo, da dve materialni karakteristiki kažeta precejšnje odstopanje. Visoka tlačna trdnost in hkrati krhkost ter nizka natezna trdnost sta ključnega pomena pri projektiranju.

Pri združevanju dveh materialov z bistveno različnima vrednostma koeficienta temperaturnega raztezka (α_T) lahko z elastičnim adhezivom zagotovimo ublažitev relativnih deformacij med obema materialoma zaradi sprememb temperature. Podobno funkcijo elastični lepljeni spoj opravlja v primeru nenadne spremembe relativne zračne vlage,

	Gostota ρ (kg/m ³)	Tlačna trdnost f_c (N/mm ²) †	Natezna upogibna trdnost f_{mt} (N/mm ²)	Modul elastičnosti E (N/mm ²)	Koeficient toplotnega raztezka α_T (10 ⁻⁵ K ⁻¹)
Navadno (float) steklo	2500	800	45	70000	0,90
Les C30	460	23	30	12000	0,50
Razmerje steklo/les	5,43	34,78	1,50	5,83	1,80

Preglednica 1 • Mehanske lastnosti za navadno steklo in les C30.

ki ima vpliv na volumske lastnosti lesa (tj. nabrekanje in krčenje).

Pri fasadnih zasteklitvah so v večini primerov uporabljeni silikoni, čeprav nimajo visokih

trdnosti, imajo pa velik odpornostni UV-indeks, kar je ključnega pomena. Na Univerzi v Mariboru, Fakulteti za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo, raziskujemo obnašanje

leseno-steklenih I-nosilcev z različnimi vrstami adhezivov ((Držečnik, 2015), (Držečnik, 2016), (Držečnik, 2017), (Zlatinek, 2014), (Zlatinek, 2015)).

7 • ZAKLJUČEK

Adhezivi in tesnila nas obkrožajo v naravi in vsakodnevem življenju. Njihova uporaba je v zadnjih 50 letih strmo narasla. To se kaže na vseh področjih, tako v industriji kot v uporabi za domače mojstre. V prispevku smo želeli predstaviti kompleksnost področja adhezivov, ki je zelo razvejano in je v konstantnem razvoju.

8 • LITERATURA

Bikerman, J. J., The Science of Adhesive Joints, New York: Academic Press, 1961.

Cognard, P., Handbook of Adhesives and Sealants – Volume 2, Adhesives and Sealants, General knowledge, Application techniques, New Curing Techniques, Oxford, Elsevier Ltd, 2006.

Cruz, P., Pequeno, J., Structural Timber-Glass Adhesive Bonding, in Boss, F., Louter, C., Veer, F., eds. Challenging Glass Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, Technical University of Delft, 2008a.

Cruz, P., Pequeno, J., Timber-glass composite beams: mechanical behaviour and architectural solutions, in Bos, F., Louter, C., Veer, F., eds. Challenging Glass Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, Technical University of Delft, 2008b.

Držečnik M., Premrov M., Ber, B., Leseno-stekleni kompozitni elementi, 37. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Ljubljana, 2015

Držečnik M., Premrov M., Štrukelj A., 2016. Advantages and disadvantages of timber glass composite beams, World Conference on Timber Engineering, Vienna, Austria,

Držečnik M., Premrov M., Štrukelj A., 2017 Uporaba stekla v gradbeništvu, 39. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Ljubljana

Gierenz, G., Karmann, W., Adhesive and Adhesive Tapes, Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2001.

Habenicht, G., Applied Adhesive Bonding, A practical Guide for Flawless results, Weinheim; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.

Petrie, E. M., ed., Handbook of Adhesives and Sealants, McGraw-Hill Companies, Inc., United States of America, 2000.

Shieldes, J., Adhesive Handbook – III. Edition, United Kingdom, Butterworth & Co Ltd, 1984.

Skeist, I., Handbook of Adhesives – III. Edition, New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1990.

Zisman, W. A., Weiss, P., ed., Adhesion and Cohesion, Elsevier, Amsterdam-London-New York, 1962.

Zlatinek, M., Premrov, M., Štrukelj, A., Experimental analysis of load-bearing timber-glass I-beam, Engineered Transparency. International Conference at glasstec, Dusseldorf, Germany 21 and 22 October 2014.

Zlatinek, M., Premrov, M., Štrukelj, A., Experimental analysis of load bearing timber-glass I-beams with silicone adhesive, Zbornik radova br. 10, Gradjevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, 2015.