

Goran Mihulja, Andrija Bogner¹

Čvrstoća i trajnost lijepljenog drva Dio I: Činitelji čvrstoće lijepljenog drva

Strength and durability of glued wood Part one: Factors of glued joint strength

Pregledni rad • Review paper

Prispjelo - received: 20. 5. 2005. • Prihvaćeno - accepted: 5. 12. 2005.

UDK 630*824.42; 630*824.51; 630*824.52

SAŽETAK • Rad obuhvaća područje osnovnog znanja o ljepilima i lijepljenju, te uključuje raspravu o činiteljima koji utječu na čvrstoću i trajnost slijepjenih spojeva od drva. Raspravlja se o poznatim fizikalnim i kemijskim procesima koji se pojavljuju pri nastajanju lijepljenog spoja, kao i svojstvima drva i ljepila koji su ključni za izradu spoja, te o procesima lijepljenja drva. Istraživanje je provedeno na temelju znatnog broja različitih pristupa brojnih istraživača kako bi se mogli uspoređivati rezultati i njihove diskusije o tim rezultatima te donijeti objektivni zaključci o sustavima lijepljenja drva. To su temeljna znanja o lijepljenju drva koja je potrebno uzeti u obzir uvijek kada se koristimo drvom jer je danas gotovo nemoguće zamisliti proizvode od drva, odnosno racionalnu uporabu drva bez postupka lijepljenja. Cilj rada je prikazati kompleksnost sustava lijepljenja drva i upozoriti na važne detalje u procesu lijepljenja koji utječu na čvrstoću i trajnost slijepjenog spoja.

Ključne riječi: adhezija, lijepljeni spoj, ljepilo, supstrat, čvrstoća lijepljenja, lomna površina

ABSTRACT • This article presents the basic knowledge about the adhesives and gluing technique, and also discusses the factors which influence glued joint strength and durability. Some physical and chemical processes which take place in adhesion are explained and discussed. Some important properties of adhesives and wood which are involved in adhesion are also mentioned. The results of many researchers are compared, and discussed. Sticking wood together is a permanent experience in woodworking industry. Thus, the field of adhesives is very important for wood and their application, and has significant technical and economical implications. The aim of this paper is to present the complexity of adhesion phenomena, focusing on many important factors which affect adhesion.

Key words: adhesion, glued joint, adhesives, substrate, glued joint strength, fracture area

1 UVOD 1 INTRODUCTION

Lijepljenje zahtjeva poznavanje procesa i raspolaganje znanjima iz kemije, fizike, reologije, čvrstoće materijala, znanosti o površinama, termodinamike, uz napor da se postigne uspješna veza i da se spoj održi.

Lijepljenje drva uvelike se razlikuje od lijepljenja drugih materijala. Kompleksnost građe drva glavni je uzrok velike raznolikosti, jer je složenost takvih sustava dodatno povećana nizom činitelja. Svi su oni međusobno povezani i ako ih zamislimo kao karike, tvore svojevrsan lanac čvrstoće spoja, a lom će nastati na najslabijoj karici. To nas navodi na zaključak da je u

¹Autori su asistent i izvanredni profesor na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

¹The authors are assistant and associate professor at the Faculty of Forestry, University of Zagreb.

procesu lijepljenja važan svaki detalj. No i uz najbrižnije vođen proces lijepljenja nikad ne postizemo maksimalnu čvrstoću spoja (Blomquist, 1963).

Stvarnu čvrstoću spoja teško je izmjeriti i još teže izračunati. Provođenje mjerenja potencijalno ipak donosi manja odstupanja od stvarnih iznosa čvrstoće ako u metodama ispitivanja pažljivo odaberemo procese primjene sile na slijepljeni spoj. Da bismo mogli odabrati najbolji proces, potrebno je poznavati slijepljeni spoj odnosno činitelje koji utječu na uspješno lijepljenje drva.

2 ČINITELJI ČVRSTOĆE LIJEPLJENJA DRVA 2 FACTORS OF GLUED JOINT STRENGTH

Čvrstoća lijepljenja drva jest otpornost na razdvajanje slijepljenog spoja. Slijepljeni drveni spoj ima drugačija mehanička svojstva od materijala od kojih je sastavljen. Dakle, govorimo o čvrstoći, odnosno svojstvima slijepljenih spojeva.

Trajnost slijepljenog spoja svojstvo je spoja da tijekom vremena zadržava svoju čvrstoću.

Kvalitetno slijepljen spoj imat će visoku čvrstoću i trajnost samo ako se u procesu lijepljenja poštuju svi činitelji koji na to mogu utjecati, a koji ovise o obilježjima drva, ljepila i procesa lijepljenja.

2.1 Kvašenje površine drva ljepilom 2.1 Wettability of wooden surface

U procesima lijepljenja drva može se ostvariti dobra veza ako tekuće ljepilo dobro kvasi površinu drva koje želimo zaljepiti. Na taj će se način ostvariti potreban bliski kontakt između molekula polimernog materijala koji rabimo kao ljepilo i površine drva, pa će to omogućiti stvaranje zadovoljavajućih adhezijskih veza. Fenomen kvašenja, a s tim u vezi i površinska energija drva, te površinska napetost ljepila, posljedica su djelovanja molekularnih sila. Još je 1805. godine Thomas Young otkrio da sićušne kapi različitih tekućina poprimaju različite oblike na krutoj podlozi. Stoga je kut između tangente povučene na profil kapi u točki gdje se ona dodiruje s površinom podloge i same površine podloge različit. Taj je kut označen s θ i zove se kut kvašenja. Kvašenje je to bolje što je kut kvašenja manji (Bogner, 1993a).

Na kvašenje površine drva utječu mnogi činitelji. Poznato je, naime, da se svježe obrađene površine drva bolje kvase te da su slijepljeni spojevi čvršći. Također

je poznato da na kvašenje utječe i čistoća površine. Masne i nečiste površine slabije se kvase, pa će i čvrstoća spoja biti slabija. No i u samoj građi drva mogu se naći sastojci koji zbog svoje niske površinske energije otežavaju kvašenje, pa time smanjuju adheziju (smola, voskovi, ulja).

Na kvašenje utječe i hrapavost površine drva. Ako tekućina dobro kvasi određenu površinu, tada hrapavost može pogodovati tom procesu, i obrnuto. S hrapavošću se mijenja slobodna površinska energija drva i ona je to veća što je veća hrapavost u granicama nekih pokusa (Bogner, 1995).

Utvrđena je korelacija između kvašenja i kvalitete lijepljenja te se mjerenjem kvašenja nekih vrsta drva ljepilom mogu odrediti mogućnosti lijepljenja (Bodig, 1962).

Da bismo poboljšali kvašenje, moramo povećati površinsku energiju drva ili smanjiti površinsku napetost ljepila toliko da adhezija bude maksimalna.

2.2 Utjecaj ljepila 2.2 Adhesive influence

Ljepilo utječe na čvrstoću lijepljenja svojim fizičkim svojstvima koja se mogu podijeliti prema dvjema vremenskim zonama djelovanja. Prvu čine svojstva koja utječu na formiranje lijepljenog spoja, a drugu ona koja utječu na čvrstoću nakon otvrdnjavanja ljepila.

Glavno fizičko svojstvo ljepila koje utječe na formiranje lijepljenog spoja jest kvašenje. Kvašenje je posljedica adhezije, penetracije i razlijevanja ljepila. Utjecaj tih činitelja ovisi o površinskoj napetosti adheziva. Stoga treba odrediti optimalnu površinsku napetost koja će najbolje odgovarati stanju površine drva, odnosno sustavu obrade te površine. Kao kriterij za određivanje optimalne površinske napetosti adheziva pogodan je adhezijski rad W_a (Bogner, 1995). On ovisi o slobodnim energijama međupovršina (Herczeg, 1965) i može se predočiti jednadžbom:

$$W_a = \gamma_{S,G} + \gamma_{L,G} - \gamma_{S,L} \quad (1)$$

pri čemu je:

$\gamma_{S,G}$ - slobodna površinska energija drva (krutine) u dodiru sa zrakom G

$\gamma_{L,G}$ - površinska napetost ljepila (kapljevine) u dodiru sa zrakom G

$\gamma_{S,L}$ -energija međupovršine drvo - ljepilo (krutina - kapljevine).



Slika 1. Ravnotežni oblik kapi i kut kvašenja
Figure 1 Drop equilibrium shape and wetting angle

Budući da je pomoću jednadžbe (1) teško izračunati adhezijski rad jer su veličine $\gamma_{S,G}$ i $\gamma_{S,L}$ teško mjerljive, adhezijski se rad obično izračunava pomoću jednadžbe (2) iz kuta kvašenja i površinske napetosti tekućine koja kvasi krutinu:

$$W_a = \gamma_{L,G} (1 + \cos \Theta) \quad (2)$$

Slobodnu energiju površine moguće je mjeriti metodom koju je uveo W. A. Zisman 1963. godine, a koja se zasniva na mjerenju kuta kvašenja za niz tekućina različite, ali poznate vrijednosti površinske napetosti $\gamma_{L,G}$.

Bitan činitelj čvrstoće spoja jest kohezijska čvrstoća ljepila koja djeluje na čvrstoću nakon stvaranja slijepjenog spoja, odnosno počinje s trenutkom koji se definira kao otvrdnuto ljepilo. Kohezijska čvrstoća utječe na energiju loma, ovisno o debljini sloja ljepila (Ebewele i sur., 1979).

Kohezijska čvrstoća djeluje u sklopu još jednog fenomena vezanja, karakterističnoga za porozne materijale u sustavu lijepljenja, koji je u drva posebno izražen, a u literaturi je poznat kao *mehanička adhezija*. Definirati je možemo kao mjeru otpora smičnom naprezanju koja ovisi o penetraciji ljepila u makroskopske, mikroskopske i submikroskopske pukotine na površini drva i o kohezijskim silama između molekula otvrdnutog ljepila. Ona je zapravo dodatni činitelj lijepljenja drva koji se u većini drugih materijala ne pojavljuje. O penetraciji ljepila ovisi čvrstoća slijepjenog drvenog spoja. Stoga osjetno smanjenje čvrstoće spoja nastaje u ekstremnim uvjetima, kada je penetracija manja od 80 μm , a koncentracija ljepila manja od 1 g/g drva (White, 1977).

Ljepila se obično utežu za vrijeme otvrdnjavanja. To je važna nuspojava u sustavima lijepljenja drva koja nastaje zbog velikih unutrašnjih napreza-nja u spoju. Utezanje je prije svega posljedica gubi-tka hlapljivih komponenti pri otvrdnjavanju. Ali čak i 100-postotni reagensi imaju neko utezanje. U tablici 1. predložen je postotak utezanja za razne vrste ljepila.

Praktičan rezultat utezanja jest lom na površini lijepljenja te moguće pukotine i slobodne površine unutar same linije lijepljenja. Elastična su ljepila bolje prilagođena naprezanjima od krutih.

Dimenzije se ne mijenjaju samo pri formiranju slijepjenog spoja. Sve organske, polimerne adhezivne

molekule prolaze stalnu, toplinski izazvanu aktivnost u nekoliko smjerova odjednom. Veličina tih kretanja primarno je određena temperaturom, gipkošću lanaca, među vezama i u manjem opsegu, punilom i fizičkim naprezanjima. Poželjno je da spoj ima određenu gipkost ili mogućnost micanja jer to uključuje/određuje otpornost i tvrdoću adhezivnog filma. Prevelika gipkost, pak, može uzrokovati puzanje, tj. plastičan tok pod naprezanjem na kraju rezultira neuspjelim lijepljenjem. Važno je znati da razlike u rastezanju između materijala koji se lijepi i ljepila mogu dovesti do toliko velikih naprezanja na liniji spoja da određene veze čine riskantnim i/ili nemogućim (Schneberger, 1980).

Sloj ljepila formira se već pri njegovu nanošenju na jednu od ploha sljubnice. Nakon priljublivanja druge plohe i stezanja ljepilo se raspoređuje u sljubnici. Može se reći da povećanje debljine sloja ljepila redovito smanjuje čvrstoću spoja (Ljuljka, 1978). To je posljedica nekoliko činitelja. Pri dodiru s materijalom u tekućem ljepilu molekule se orijentiraju po površini na granici ljepilo - materijal. Ista orijentacija nastaje od površine ljepila u smjeru debljine njegova sloja. Ta je orijentacija ograničena i u debljem sloju ljepila, gdje ne ide cijelom debljinom, tako da u sredini ostane dio ljepila bez orijentiranih molekula. Budući da je područje s orijentiranim molekulama čvršće, u debljem sloju ljepila jedan je dio oslabljen pa otuda i manja čvrstoća.

U debljim slojevima ljepila unutrašnja su naprezanja veća zbog kontrakcije volumena u vremenu otvrdnjavanja. Ta naprezanja pogoršavaju adhezijsku vezu i uzrokuju pojavu mikropukotina te se čvrstoća spoja smanjuje. U debljem sloju broj mikrogrešaka je znatno veći, pa i to utječe na smanjenje čvrstoće spoja.

Spojevi s tanjom sljubnicom imaju veću krutost, nema velikih deformacija na krajevima sljubnica pa to povećava čvrstoću spoja.

Debljina sloja ljepila ima neku donju granicu ispod koje se čvrstoća smanjuje. Donja granica debljine ljepila ovisi o svojstvima određene vrste ljepila jer ona određuju načine apliciranja. Osnovni pokazatelj donje granice jest pojava *gladne* sljubnice, koja se očituje velikim gubitkom čvrstoće, a posljedica je isprekidanosti filma ljepila u sljubnici.

U tipično lošem spoju na oba se kraja pojavi delaminacija ili se cijela površina razdvoji. Pregled površine loma (pri delaminaciji) otkriva određena obi-

Tablica 1. Tipično utezanje za različite tipove adheziva
Table 1 Typically shrinkage for some adhesive types

Tip ljepila – Type of adhesive	Utezanje – Shrinkage, %
Akrlina	5-10
Anaerobna	6-9
Epoksidna	4-5
Uretani	3-5
Poliamidi (termoreaktivni)	1-2
Silikoni (otvrdnjavajući)	manje od 1

lježja. Na mekom drvu fine teksture, poput bije-log bora ili difuzno poroznoga tvrdog drva poput javorova, lomna površina djeluje glatko (sjajno), ali se pažljivim promatranjem može uočiti da je ljepila vrlo malo ili ga uopće nema. U prstenasto poroznih listača poput hrastovine lomna površina može biti grublja zbog ukrućenog ljepila koje viri iz velikih pora ili površine iskinutoga ranog drva. Pregledom pod mikroskopom, pri povećanju od 10 do 15 puta, može se otkriti da nema filma ljepila (River i Okkonen, 1991). Takav spoj nazivamo gladnim spojem (sljubnicom).

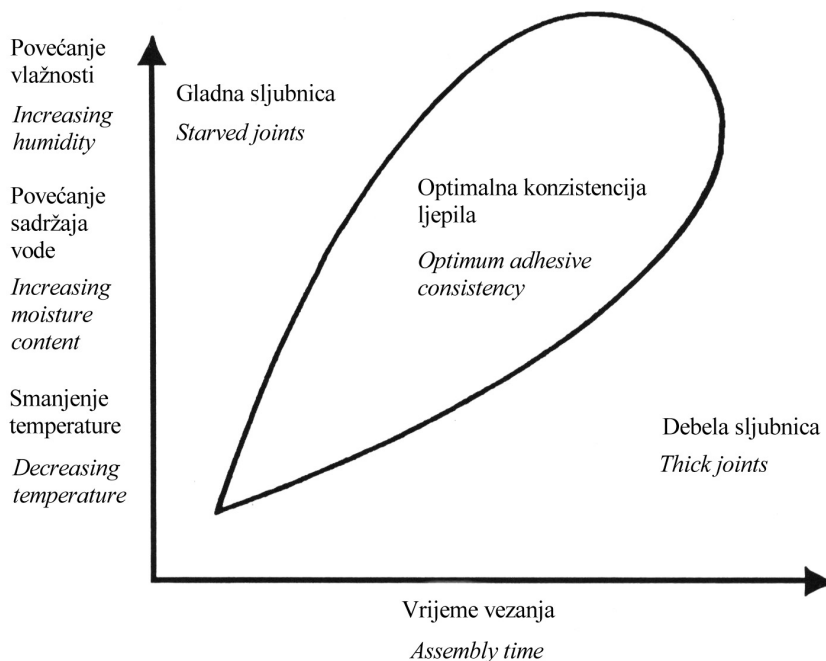
U gladnoj sljubnici većina je ljepila istisnuta izvan spoja pa ga ne ostaje dovoljno da bi tvorilo neprekinuti film ljepila između elemenata drva. Linija ljepila je isprekidana i čvrstoća spoja ovisi samo o mjestimično raspoređenim odsječcima filma ljepila koji ga drže. Čvrstoća u gladnoj sljubnici (koja se još nije razdvojila) samo je mali dio čvrstoće odgovarajućeg spoja s neprekinutim filmom ljepila. Formiranju gladne sljubnice pridonose tri tipična činitelja: vrsta drva, konzistentnost ljepila i pritisak pri lijepljenju.

Vrsta drva je, naravno, relativno nekontrolirana veličina zbog raznolikosti unutarnje građe. Općenito se može reći da je drvu veće gustoće ili onomu s više pora kritičnije odrediti optimalne uvjete lijepljenja i kontrolirati ih u proizvodnji. Problem gladne sljubnice posebno je čest u hrastovine, koja ima veliku gustoću i izrazito velike pore. Vrste drva velike gustoće zahtijevaju velike pritiske kako bi se prevladale male nepravilnosti površine i kako bi se površina "prisilila" na ujednačenu udaljenost po cijeloj dužini sljuba. Pri tako velikim pritisacima ljepilo ulazi u pore drva. Ta je

pojava posebno izražena u prstenasto poroznih vrsta.

Glavni činitelji koje možemo kontrolirati kako bismo izbjegli gladnu sljubnicu jesu konzistentnost ljepila i pritisak prešanja. Kada ljepilo dođe u dodir s drvom, konzistentnost mora biti dovoljno niska da se popune sve nepravilnosti na površini drva i omogući dobar adhezijski kontakt. Ako se ljepilo nanosi samo na jednu stranu, konzistentnost mora ostati niska dok se drugi element ne priljubi. Kada se ostvari adhezija obiju strana koje se lijepe, niska konzistentnost postaje nepoželjna. Djelomično je tečenje još pogodno dok se spoj opterećuje. Ljepilo penetrira u površinu, a višak izlazi te nastaje tanki kontinuirani film između sljubnica.

Velika konzistentnost smanjuje rizik od pojave gladne sljubnice, ali povećava mogućnost pojave lošeg spoja i debelog sloja ljepila. Vrijeme i količina nanošenja ljepila određuju kako će brzo rasti konzistentnost. Mala količina nanosa može izravno prouzročiti gladnu sljubnicu jer nanos ljepila nije dovoljan da se stvori neprekinuti sloj. Nasuprot tomu, i vrlo debeo nanos može rezultirati gladnom sljubnicom jer se ljepilo zbog velike količine tekućine sporo veže, pri čemu konzistentnost prije pritezanja ostaje malena pa se njime iz sljubnice istisne prevelika količina ljepila. Visoka vlažnost zraka, visoki sadržaj vode u drvu i niska temperatura drva i zraka usporavaju porast konzistentnosti. Konzistentnost se može mijenjati variranjem vremena vezanja (sl. 2). Za vrijeme vezanja konzistentnost ljepila raste kako tekućina iz njega izlazi ili se apsorbira u drvo, odnosno kako napreduje kemijsko učvršćivanje.



Slika 2. Shematski prikaz područja optimalne konzistentnosti ljepila
Figure 2 Schematic view of optimum adhesive consistency

2.3 Utjecaj drva (supstrata)

2.3 Wood (substrate) influence

Osim ljepila, važan činitelj koji utječe na čvrstoću lijepljenja svakako je drvo koje lijepimo, odnosno njegovo mehaničko ponašanje u spoju. Izraz *mehaničko ponašanje* odnosi se na fizikalne veličine, poput deformacije, koje tijelo doživljava kao rezultat primjene sile i utvrđivanja uvjeta u kojima se provodi, a povezani su s popuštanjem ili čvrstoćom materijala. Očito je da se takva ponašanja moraju moći predvidjeti kako bi se mogla projektirati zadovoljavajuća konstrukcija spoja. Osnovni pristup teoriji mehaničke deformacije jest predviđanje makroskopskog ponašanja na temelju poznavanja fizikalnih svojstava i strukture molekula tog materijala. Međutim, takav je pristup vrlo složen pa se priklanjamo manje fundamentalnom pristupu, koji se pokazao korisnim u razvoju razumijevanja mehaničkog ponašanja. Tako se većina teorija temelji na eksperimentalnom promatranju makroskopskog ponašanja.

Fenomeni puzanja i relaksacije dva su srodna, vremenski ovisna mehanička svojstva materijala. Deformacija ne ovisi samo o sili koja djeluje u vremenu već o cjelokupnom djelovanju na materijal. Čvrstoća drva uvelike ovisi o vremenskom faktoru. Poznato je da eksperimentalno promatrana čvrstoća drva ovisi o brzini opterećivanja proba. Tako drvo može kratko vrijeme izdržati određeno opterećenje, a popustiti kada opterećenje traje dulje.

Pri malom opterećenju drvo se ponaša približno kao linearno viskoelastični materijal (Pentony i Davidson, 1962). Deformacije koje se odnose na puzanje u smjeru žice drva linearno su elastične samo ako su naprezanje, vlažnost i temperatura dovoljno niski. Promatranjem odnosa puzanja i naprezanja u smjeru paralelnom s vlakancima utvrđeno je da se linearnost proteže između 36 i 84% statičke čvrstoće raznih vrsta drva (Schniewind, 1968). Iznad tog područja drvo se počne nelinearno ponašati i oto se djelomično može pripisati strukturnim promjenama. Mogu se uočiti velike anatomske promjene, posebno ako je drvo opterećeno okomito na žicu vlakana (Kollmann, 1961).

Temperatura također ima znatan utjecaj na deformacije, pa tako u svježe oborenog drva puza-nje, koje nastaje savijanjem, eksponencijalno raste s povećanjem temperature od 5 do 70 °C. Isti se efekt pojavljuje u osušenom drvu, ali pri 100 - 180 °C.

Vlaga u drvu djeluje kao plastifikator, i to tako da je puzanje u vlažnom drvu veće, a modul elastičnosti manji i to pri istezanju i pri kompresiji paralelno i okomito na vlakanca. Povećanje vlažnosti za 1% ima otprilike jednak utjecaj kao povećanje temperature za 6 °C, dok trajanje vlažnosti nema različit utjecaj (Schniewind, 1968). Međutim, ciklična promjena vlažnosti uvelike smanjuje vrijeme do loma pod stalnim opterećenjem (Schniewind, 1967).

Sadržaj vode u drvu prije lijepljenja znatno utječe na čvrstoću i kvalitetu spoja. Optimalni rezultati lije-

pljenja za različite vrste ljepila postižu se pri različitim sadržajima vlage drva. Ovisno o različitim tehnologijama i uvjetima primjene, sadržaj vode u drvu kreće se u granicama od 8 do 14%. U tim granicama uglavnom nema problema pri lijepljenju, ali uz uvjet da je vlažnost svih slijepljenih dijelova podjednaka (Bogner, 1986). Ipak i pri takvoj vlažnosti, ako u zimskim uvjetima hladni drveni elementi dođu u topao radni prostor, nastaje površinska kondenzacija i znatno povećanje vlažnosti na površini drva, što uzrokuje greške u lijepljenju. Sadržaj vode manji od 6% može prouzročiti greške u više vrsta ljepila (Pecina, 1970). Za industrijsko lijepljenje jele/smreke rezorcin formaldehidnim ljepilom potrebna je vlažnost drva od 9 do 10% (Petrović, 1980). Za lijepljenje tvrdih listača karbamidnim ljepilom optimalna se čvrstoća postiže pri vlažnosti drva u granicama od 5 do 15% (Ljuljka, 1978). Laidlaw i Pakston za niz ljepila (RF, PF, RF/PF, MF/UF, UF, kazein, PVAC) navode da se optimalna čvrstoća postiže kada je vlaga drva između 12 i 15%. Vidljivo je da za razne vrste ljepila autori iznose različite optimalne vlažnosti drva, te da je generaliziranje nezahvalno jer vlaga različito djeluje na različita ljepila.

Deformacija drva uvelike ovisi o činjenici da je drvo porozno tijelo, odnosno struktura, tako da su svi aspekti reologije uzročno-posljedično povezani sa strukturom. Strukturna svojstva drva, uz kemijska, određuju fizička svojstva drva, a ona pak diktiraju njegova mehanička svojstva. Drvo je biogeni materijal te je njegova različitost i genetički uvjetovana. Svaki živi organizam, pa tako i drvo, u rastu prolazi nekoliko faza koje se međusobno znatno razlikuju. Poznato je da se može govoriti o tri faze razvoja (Govorčin, 1996). To su: nezrelost, zrelost i prezrelost. Najvažnija varijacija strukture uvjetovana sazrijevanjem nezrelog drva izražena je porastom dimenzija aksijalnih elemenata od srčike prema periferiji debla. Promjene u strukturi drva uvjetuju promjene njegovih fizičkih i mehaničkih svojstava. Fizička i mehanička svojstva juvenilnog drva promjenljiva su i znatno se razlikuju od fizičkih i mehaničkih svojstava zrelog drva, koja su manje-više konstantna.

Kemijski sastav drva varira od srčike prema periferiji. U tom smjeru raste sadržaj celuloze, a pada sadržaj lignina. Promjene u sadržaju celuloze slažu se s varijacijama dužine traheida.

Promjena debljine stanične stijenke odraz je promjene srednjeg podsloja sekundarnog sloja jer je debljina ostalih slojeva konstantna. Budući da je središnja lamela izgrađena pretežno od lignina, a u primarnom sloju stanične stijenke udio lignina je dva puta veći, odnosno udio celuloze dva puta manji od udjela u sekundarnom sloju, s promjenama debljine stanične stijenke mijenja se i odnos lignina i celuloze u drvu. Juvenilno drvo, s obzirom na elemente građe tanjih staničnih stijenki, ima veći udio lignina, a manji udio celuloze nego zrelo drvo.

Vidljivo je da promjenljivost strukture drva uvelike pridonosi raznolikosti svojstava koja imaju izra-

van utjecaj na sustave lijepljenih spojeva, te da se raspon raznolikosti ne može kontrolirati u primjeni drva.

2.4 Svojstva površine drva

2.4 Wood surface properties

U geometrijskom smislu "površina" je dvodimenzionalna i nema unutrašnje i vanjske strane. U tehničkom smislu "površina" čini granicu tijela i uz nju su uvijek vezani pojmovi vanjska i unutrašnja strana. U ovom se radu pojam površine rabi kao tehnički termin.

Pod pojmom *vanjska površina* potrebno je zblížiti "geometrijsku površinu" s "hrapavošću". Pri tome se hrapavost definira kao "mnogostrukost uzvišenja i udubljenja na površini čija se prostorna isprekidanost može primijetiti optički ili dodirnom" (Jirouš-Rajković, 1991). S obzirom na to da ne postoji idealno glatko čvrsto tijelo, stvarna površina uvijek je veća od matematičke.

Adhezijska ili vezujuća sila između dva kruta materijala općenito je vrlo malena zato što površine nisu idealno ravne, te je bliski dodir na razini atoma ograničen na mali broj dodirnih mjesta. Ta pojava sprečava djelovanje privlačnih površinskih sila. Zbog toga se između površina nanosi tekući vezivni materijal koji gotovo potpuno dodiruje površinu i tako dolazi u bliski kontakt s velikim brojem atoma krutog materijala. Stoga će uspješnost lijepljenja ovisiti o svojstvu ljepljivosti da dobro kvasi površinu drva. Ta se pojava posebno ističe u "trodimenzionalnih" materijala poput drva. Trodimenzionalnost u tom primjeru označuje raznolikost građe i svojstava u prostoru. Građa drva toliko utječe na svojstva površine u dodiru s tekućinama da ne možemo govoriti o klasičnom pojmu površine.

Za definiranje površinskih svojstava drva moraju se poznavati svojstva kao što su poroznost, permeabilnost te ortotropnost. Na primjer, na mjerenje kuta kvašenja izravno utječe penetriranje tekućina u strukturu materijala. Različita priprema površine rezultira različitim vrijednostima mjerenja, a to znači da površine, kako bi se smanjio njihov nepovoljan utjecaj, treba obraditi odnosno pripremiti što je moguće bolje. Pripremiti znači promijeniti njihova trenutačna svojstva ili im modificirati površinu, a to se, prema Bognerovim (1993b) istraživanjima, može učiniti mehaničkim metodama, kemijskim aktiviranjem ili ozračivanjem.

Sve se estetske prednosti, ali i manjkavosti drva kao građevnog materijala i osnovne sirovine za izradu brojnih uporabnih i umjetničkih predmeta, očituju na njegovoj površini. Higroskopnost, nepostojanost prema djelovanju svjetlosti, atmosferilija, kemijskih djelovanja, mehaničkog habanja i oštećivanja, slabljenje veze prevlake i ljepljivosti s drvom te, najčešće, djelovanjem bioloških razarača, događaju se ili započinju na površini (Turkulin, 1993). Stoga se sprečavanjem narušavanja cjelovitosti i estetskih promjena površine zapravo izravno utječe na kvalitetu predmeta izrađenih od drva. Postoje bogata iskustva iz

proučavanju narušavanja cjelovitosti površine drva u vanjskim uvjetima. Detaljne SEM i optičke mikroskopske analize (Turkulin i sur., 2001) pokazale su strukturne posljedice koje nastaju na prirodnom i površinski zaštićenom drvu.

Postoje iscrpna istraživanja o fotodegradacijskim procesima na drvu, te su razvojem metode tankih listića (70 μm debelih odsječaka površine) ustanovljene posljedice izlaganja umjetnoj svjetlosti (u Xenotest i QUV uređajima) i prirodnoj svjetlosti, te korelacija među njima (Turkulin 1996, Derbyshire i sur., 1996). Prirodno stajanje i izlaganje drva svjetlosti prije površinske obrade bitno smanjuju adheziju i trajnost prevlaka (Jirouš-Rajković, 1991). Drvo moramo promatrati kao dinamičan sustav; u njemu se stalno događaju fizikalne i kemijske promjene. Pod utjecajem zraka, vode u zraku, svjetlosti i dr. mijenja se volumen, oblik, površina, kemizam, pa i utjecaj na ljepljivost. Poznato je pravilo da obrađene sljubnice treba što prije slijepiti. D. A. Stumbo (1964) istraživao je utjecaj starenja površine drva na čvrstoću spoja, uz konstantnu vlažnost, bez utjecaja svjetlosti i prašine, te je ustanovio da se stajanjem obrađene površine čvrstoća spoja smanjuje za 0,07 do 0,14 daN/cm^2 (ispitivanje na vlak), nakon tri mjeseca stajanja čvrstoća spoja pada za 12 do 33 %, a za pet mjeseci 30 do 50 %.

Međutim, postoje naznake da ultraljubičasto zračenje pri kontroliranoj vlažnosti i temperaturi površine može, nasuprot dugogodišnjim uvjerenjima o isključivo destruktivnom djelovanju, poboljšati mehaničku cjelovitost (Turkulin 1996, Derbyshire i sur., 1996), a time i adheziju i čvrstoću lijepljenja ili prijanjanja prevlaka (Mihulja i sur., 1999).

Priprema površine, odnosno elementa koji treba lijepiti, započinje procesima koji fizički uzrokuju promjene u materijalu. Prve stvarne promjene stanja površine počinju sušenjem.

Intenzivno sušenje drva može pridonijeti nepovoljnim reakcijama na površini, uzrokovanim visokim temperaturama i presušivanjem, a njihov se utjecaj odnosi na smanjenje čvrstoće zalijepljenih spojeva. Posebno velik utjecaj ima na površinama koje se nakon sušenja više ne obrađuju, a suše se pri relativno visokim temperaturama (furniri, iverje) (Bryant, 1968). Christiansen je 1991. godine objavio pregled relevantne literature o tome kako se presušivanjem inaktivira površina drva, čime se smanjuje kvaliteta lijepljenja. Pregled (Christiansen, 1991) uglavnom obuhvaća lijepljenje vrućim prešanjem fenolnih ljepljivosti, a podijeljen je u dvije glavne kategorije: fizičke posljedice i kemijske reakcije izazvane presušivanjem drva. Prvi dio pokriva opće aspekte inaktivacije površine drva i pregled tipičnih mehanizama kojima presušivanje oslabljuje lijepljeni spoj. Tri navedena fizička mehanizma jesu: 1. izvlačenje na površinu ekstraktivnih tvari koje smanjuju kvašenje ili prekrivaju površinu; 2. preorijentacija molekula na površini drva, što reducira kvašenje ili smanjuje površine na kojima se ostvaruje vezanje kemijskim kontaktom; 3. nepovratno zatvaranje velikih mikropora na stjenkama

stanica, koje ograničava penetraciju. Drugi dio pokazuje kako kemijske reakcije vezane za presušivanje mogu izazvati inaktivaciju površine drva za lijepljenje. One obuhvaćaju slabljenje čvrstoće površine drva, oksidaciju i pirolizu veznih mjesta na površini za lijepljenje, kemijske smetnje u otvrdnjavanju smola za lijepljenje i eliminiranje hidrosilnih spojeva s površine za lijepljenje stvaranjem eterskih veza.

Oksidacija i piroliza stvarno postoje samo pri dovoljno visokim temperaturama i dovoljno dugom djelovanju. Prema interpretaciji podataka iz literature, Christiansen objašnjava da je oksidacija relativno spor proces na temperaturama na kojima se pojavljuje inaktivacija te stoga nije razlog nastanka procesa inaktivacije pri lijepljenju vrućim prešanjem, osim kod je koncentracija kiselosti ekstrakta mala.

U daljnjem radu na istom području nije dokazano da presušivanje drva pri visokim temperaturama sušenja utječe na čvrstoću lijepljenja. Međutim, dokazano je da dolazi do smanjenja kvašenja, a kako ploče od uslojenog drva za to istraživanje nisu proizvedene u pogonskim uvjetima, ostalo je nepoznato je li uzrok mala količina proizvodnje uzoraka ili inaktivacija stvarno ne utječe na čvrstoću lijepljenja (Christiansen, 1994).

Mehaničkom obradom može se postići različita hrapavost površine, koja je određena faktorom hrapavosti. Uvrštavanjem faktora hrapavosti r u Youngovu jednadžbu može se izračunati kosinus kuta kvašenja na hrapavim površinama, što je predočeno jednadžbom:

$$\cos \theta' = r \cdot \cos \theta = r \cdot \frac{\gamma_{S,G} - \gamma_{S,L}}{\gamma_{L,G}}$$

r - faktor hrapavosti (za idealno glatke površine $r = 1$, a za hrapave površine $r > 1$)

$\cos \theta'$ - kosinus kuta kvašenja na hrapavoj površini

$\cos \theta$ - kosinus kuta kvašenja na glatkoj površini

$\gamma_{S,G}$ - energija na granici kruto - plinovito

$\gamma_{L,G}$ - energija na granici kruto - kapljevito

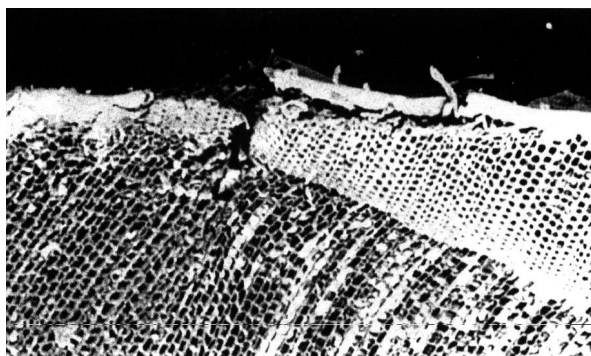
$\gamma_{S,L}$ - energija na granici kapljevito - plinovito.

Iz jednadžbe je vidljivo da hrapavost multiplicira kvašenje, a time pomaže razlijevanju, penetraciji i adheziji.

Među rezultatima koje su postigli brojni autori istražujući mehaničke metode modificiranja površine najvažniji su slijedeći:

- Ručno brušeni uzorci imaju veću energiju loma od strojno brušenih uzoraka.
- Među strojno brušenim uzorcima veću energiju loma postižu uzorci brušeni okomito na vlakanca.
- Starenjem sljubnice smanjuje se čvrstoća spoja.
- Penetracija ljepila veća je pri strojnom nego pri ručnom brušenju. To se objašnjava načinom ručnog brušenja, kada se pri povratnom pokretu brusnog papira zacijepi stanična stijenka i tako zatvore lumeni staničja.

Mnogi su se istraživači bavili kvalitetom površine nakon različitih sustava mehaničke obrade. Još je 1963. godine utvrđeno da se na površini drva ravne žice, od strane srži, mehaničkom obradom dobivaju najlošije površine. Ta se pojava pripisivala nastojanju pukotina zbog većeg bubrenja kasnog drva. Broj pukotina na površini od strane srčike nije jednak onome od strane kore, pa je utvrđeno da pukotine ne nastaju samo zbog atmosferskih utjecaja, odnosno bubrenja, nego i zbog mehaničke obrade. Ta se površinska pukotina ne pojavljuje samo kao delaminacija u zoni prelaska goda već i okomito na njegovu liniju (sl. 3), i to ne na samom površinskom spoju zone ranog i kasnog drva, već na manjoj udaljenosti od nje (Stehr i Östlund, 2000). Razlog tome je kruti tanki sloj kasnog drva koji leži na elastičnijem ranom drvu te pri pritisku oštrice reznog tijela ili zbog relaksacije drva nakon prijelaza oštrice nastaje lom tipičan za površinsku obradu. Te će tipične greške biti manje ako se primijene nježniji režimi obrade, poput višeslojnog blanjanja i pjeskarenja.



Slika 3. Specifičan lom pri obradi površine drva okrenute prema srži
Figure 3 Specific pith side brake due to mechanical influence

Mehanički se površina za lijepljenje često priprema blanjanjem. Budući da svako mehaničko djelovanje na površinu drva ostavlja trag na staničju, jasno je da ono ima velik utjecaj na čvrstoću tog staničja pa tako i na čvrstoću spoja. Nepravilnom se oštricom pri brušenju radi veći pritisak na stanice tako da ono zapravo nije rezanje nego gnječenje i uklanjanje deformiranih stanica koje su izgubile svoju prirodnu čvrstoću i vezu s okolnim staničjem. Međutim, slijepljeni spojevi drva ne pokazuju razliku u čvrstoći na takvoj i na glatkoj površini koja je obrađena pravilnom reznom oštricom blanjalice (Jokerst i Stewart, 1976; Murmanis i dr., 1983; Hernández, 1994). Nasuprot tomu, uočljiv je utjecaj deformiranih stanica kada je slijepljeni materijal izložen vlaženju, pri čemu stanice u pokušaju da se vrate u prvobitan oblik nabubre mnogo više nego nedeformirane i prouzroče unutrašnje naprezanje, odnosno uništavanje spoja zbog smanjene čvrstoće površinskog sloja (Jokerst i Stewart, 1976). Tako samo jedan ciklus vlaženja i sušenja pokazuje velike razlike u čvrstoći spoja blanjanja i brušenih površina (Murmanis i dr., 1983). Ta se pojava

očituje i različitom kvalitetom površina izrađenih klasičnim blanjanjem i specijalnom obradom koja daje još bolje obrađenu površinu (*fixed-knife pressure-bar planing*). Ona se temelji na kontroli plastične deformacije drva koja se događa ispred noža za obradu. Uz malu brzinu noža istodobno treba raditi pritisak na površinski loj stanica ispred njega, čime se kontrolira pravilan lom u ravnini kretanja oštrice (Hernández, 1994).

Promatranje mikroskopom potvrđuje te tvrdnje, a glavni uzrok brzog slabljenja kvalitete spoja pripisuje se pojavi pukotina u sloju staničja S2 na brušenim površinama, dok se lom na blanjanim površinama kretao između slojeva S1 i S2. Veličina zrna u abrazivu te struktura i gustoća drva imaju veći utjecaj na dubinu i tip oštećenja nego brzina pomaka i debljina sloja koji se brusi (Murmanis i dr., 1986). Pukotine okomite na smjer prstenastog protezanja linije goda češće su na površinama na kojima nagib goda zatvara mali kut s površinom (Stehr i Östlund, 2000).

2.5 Utjecaj procesa lijepljenja

2.5 Influence of gluing process

Otvoreno vrijeme je vrijeme od časa nanošenja ljepila do priljublivanja elemenata punim pritiskom. Veličina otvorenog vremena i vremena stezanja ovisi o procesu i materijalu u širokim granicama, od nekoliko sekundi do nekoliko sati. U pravilu, otvoreno je vrijeme kraće od vremena stezanja. Tijekom otvorenog vremena otapala i tekućine, u kojima je disperzirano ljepilo, mogu ulaziti u podlogu (drvo, drveni materijal) i, ovisno o hlapljivosti, izlaziti iz ljepila u zrak. Ljepilo postaje sve viskoznije i u mnogim je primjerima čvrstoća spoja sve manja, osobito kod ljepila velike viskoznosti. Kada se ljepilo nanosi na obje plohe sljubnice, produženje otvorenog vremena manje je štetno.

Otvoreno vrijeme ovisi i o vrsti drva. Za jako porozne vrste drva otvoreno je vrijeme po pravilu kraće jer voda ili drugi medij prije, i u većoj količini, ulaze u drvo nego u manje poroznih vrsta. Prema tome, za porozne se vrste otvoreno vrijeme skraćuje ili se povećava nanos ljepila.

Za kontaktna je ljepila određeno neko minimalno otvoreno vrijeme i ono ne umanjuje čvrstoću spoja. Veće prekoračenje tog vremena negativno utječe na čvrstoću spoja.

Nakon sastavljanja ili slaganja elemente koji se lijepe potrebno je stegnuti da bi se osiguralo potpuno nalijeganje površina, izlazak viška ljepila i dobivanje sloja ljepila željene debljine. Kada je površina savršeno glatka i obje plohe sljubnice potpuno ravne ili jednako zakrivljene, potpuni se kontakt lako postiže uz mali utrošak ljepila i uz slab pritisak. Kada su plohe hrapave i neravne, potreban je velik pritisak i velika količina ljepila. Na veličinu pritiska utječe i viskoznost ljepila. Uz ljepila veće viskoznost potreban je i veći pritisak.

Sam pritisak pri većini ljepila nema utjecaja na čvrstoću lijepljenja. Za drvo je nešto drukčije. U praksi se za priljublivanje loše obrađenih i zakrivljenih ele-

menata primjenjuju veći pritisci. Iako se velikim pritiskom površine priljubljuju i ljepilo nakon što otvrdne zadrži plohe u spoju, takav spoj ima unutarnja naprezanja. Dovoljno je da se tijekom daljnje eksploatacije pojave mala dodatna naprezanja pa da se spoj rastavi.

Načelno se treba koristiti minimalnim pritiskom koji u određenim uvjetima zadovoljava. Dobro lijepljenje, uz nisku viskoznost i glatke i ravne plohe, može se postići pritiskom od 5 do 10 N/cm². Maksimalni pritisak ovisi i o svojstvima materijala. Tako se meko drvo, posebno furniri od mekog drva, lijepe uz manji pritisak, npr. od 10 do 50 N/cm², a furniri od tvrdog drva pritiskom od 40 do 70 N/cm². Za elemente većeg presjeka pritisci su nešto veći, npr. za elemente od tvrdog drva iznose i do 80 - 100 N/cm². Pritisci veći od 100 N/cm² primjenjuju tek za vrlo viskozna ljepila, ali po pravilu nisu veći od 150 N/cm². Optimalan pritisak može se predočiti kao koeficijent iznosa čvrstoće na tlak površine koja se lijepi (Rabiej i Behm, 1992). Tako je za lijepljenje javora UF ljepilom potreban tlak od 0,3 puta iznosa čvrstoće na tlak i 0,5 puta za PVA ljepilo. Ujedno vrijedi načelo da vrijeme stezanja pri lijepljenju PVAC ljepilom za prstenasto porozne vrste drva mora biti nešto dulje nego za difuzno porozne (McNamara i Waters, 1970). Istraživanja su pokazala da je za postizanje 80 %-tne čvrstoće lijepljenog spoja (nakon 8 sati) potrebno dva puta dulje vrijeme stezanja za hrastovinu nego za javorovinu.

U duroplasta je otvrdnjavanje moguće pri sobnoj i pri povišenoj temperaturi. Toplina se dovodi predgrijavanjem, vođenjem ili u polju struje visoke frekvencije. Uz termoplastična ljepila proces se katkad može ubrzati dovođenjem topline (pri lijepljenju disperzivnim ljepilima).

Otvrdnjavanje ljepila počinje u uređaju za stezanje i često nije dovršeno kada se obradak vadi iz uređaja, nego se nastavlja u daljnjem procesu i tijekom uskladištenja.

Čvrstoća u času vađenja iz uređaja za stezanje ne bi smjela biti manja od 20 do 30 % konačne čvrstoće (Ljuljka, 1978). Ako nakon lijepljenja odmah slijedi mehanička obrada udarnim opterećenjima, onda čvrstoća pri vađenju iz uređaja za stezanje mora iznositi 40 - 50 % konačne čvrstoće. Pri lijepljenju zakrivljenih elemenata čvrstoća u času vađenja mora biti 60 - 70 % konačne, jer se zbog svojstva elastičnosti elementi nastoje ispraviti.

Povećanje ili sniženje temperature skraćuje ili produljuje vrijeme stezanja. Međutim, VF zagrijavanje kojim se skraćuje vrijeme stezanja može utjecati na čvrstoću spoja. Tako se nekim ljepilima postiže veća čvrstoća pri otvrdnjavanju na sobnoj temperatura, to se može objasniti time što ljepilo otvrdnuto VF strujom otvrdnjuje pri povišenoj temperaturi i zatim se hladi, te u njemu nastaju unutarnja naprezanja.

Zaostala naprezanja u spoju nastaju tijekom procesa lijepljenja, i rezultat su mnogih činitelja, od kojih se mogu spomenuti neki važniji:

- naprezanje izazvano nepravilnim geometrijskim oblikom sljubnice (lijepljene površine)

- naprezanje zbog kontrakcija volumena ljepila tijekom procesa otvrdnjavanja
- naprezanje zbog promjena sadržaja vode u drvu (utezanje i bubrenje)
- naprezanje zbog različitih termičkih koeficijenata dilatacije ljepila i drva.

Dodavanjem etilsilikata u PVAc postiže se smanjenje početnih unutrašnjih naprezanja, a dodavanjem bikromata, uz katalitički utjecaj mineralne kiseline (fosforne kiseline), stvara se prostorna struktura u polimerizacijskom procesu i u vezi s tim postižu se i odgovarajuća bolja svojstva slijepljenog spoja (Semenov, 1980).

Dio unutrašnjih naprezanja nekog spoja čine zaostala naprezanja koja izravno utječu na čvrstoću spoja jer se multipliciraju eksploatacijskim naprezanjima i tako uz isti predznak dovode do znatno većih naprezanja u spoju od onih iz proračuna.

Velika naprezanja u sloju ljepila mogu uzrokovati nastanak mikropukotina u sloju ljepila koje mogu postati izvori destrukcije, pa stoga izravno umanjuju čvrstoću i trajnost spojeva (Bogner i sur., 1999).

2.6 Ostali činitelji

2.6 Other factors

Lijepljeni spoj ostvaren između dva elementa drva mora biti takve kvalitete da dosegne zahtjeve čvrstoće cijele strukture, te u upotrebi mora biti otporan na utjecaj okoline. Razvoj industrije ljepila doveo je do proizvodnje ljepila širokog raspona upotrebe, a tehnologija njihove upotrebe na suhom netretiranom drvu dobro je poznata. Međutim, često se pokazuje potreba za lijepljenjem vlažnoga ili kemijski zaštićenog drva, o čemu će biti riječi u daljnjem tekstu.

2.6.1 Lijepljenje vlažnog drva

2.6.1 Gluing wet wood

U specifikacijama proizvođača ljepila stoji da se drvo treba osušiti na određenu vlažnost prije lijepljenja. Međutim, proces sušenja je skup i dugotrajan. Za mnoge uporabne namjene, posebno za one u vlažnim uvjetima, svakako je prednost lijepiti drvo pri visokoj vlazi. Uspjeh takvog pristupa ovisit će o osjetljivosti pojedinih ljepila na vlagu u drvu i slabljenju kvalitete spojeva izrađenih u takvim uvjetima. Prvi je korak ostvariti svojstva i odrediti ograničenja za ljepila. Laidlaw i Pakston (1974) tvrde da se, unatoč varijabilnosti, zadovoljavajući spoj na zraku sušenog drva (približno 18 - 22 % vlage) može dobiti uz pomoć bilo kojeg uobičajenog ljepila za drvo, te da se za drvo s visokim sadržajem vlage preporučuju samo ljepila poput resorcinol-formaldehidnih ili resorcinol-formaldehidnih/fenol-formaldehidnih.

Nekontroliranje vlažnosti drva pri izradi lijepljenih spojeva može rezultirati slabim spojevima koji se lako razdvajaju. Razumijevanje utjecaja vlage i smanjivanje njezinih varijacija u drvu vjerojatno je najbolji način sprečavanja grešaka pri lijepljenju.

Za elemente koje treba lijepiti vrlo je važan ujed-

načen sadržaj vlage među njima, ali i unutar svakog elementa zasebno. Svaka neujednačenost veća od 2 % može izazvati takva naprezanja u spoju da je lom neizbježan i bez dodatnih naprezanja vanjskim opterećenjem (River i Okkonen, 1991).

2.6.2 Lijepljenje kemijski obrađenog drva

2.6.2 Gluing chemical treated wood

Slabo trajne vrste drva s visokim sadržajem vlage podložne su napadu gljiva koje ih razgrađuju ako nisu zaštićene nekim od zaštitnih premaza. Sve veće količine tako obrađenog drva koriste se u gradnji, a kako takav materijal često moramo lijepiti, potrebno je odrediti razinu kompatibilnosti sa zaštitnim sredstvom i činiteljima koji utječu na održanje spoja.

Zaštitna sredstva poput tributylloksida ili pentaklorfenola imaju, ovisno o upotrijebljenom ljepilu, mali utjecaj na slabljenje kvalitete lijepljenja. Evidentno smanjenje kvalitete spoja uočava se s povećanjem količine voska (Laidlaw i Pakston, 1974). Laidlaw i Pakston razvili su prigodnu test-metodu za posebno formulirane zaštitne premaze, s mogućnošću testiranja efikasnosti u različitim situacijama. Takvim je eksperimentima dokazano da drvo treba slijepiti u roku dva dana od umakanja jer daljnje odgađanje smanjuje kvalitetu lijepljenja, posebno ako je zbog permeabilnosti upijanje zaštitnih sredstava veliko.

3 ZAKLJUČCI

3 CONCLUSIONS

U međusobnoj interakciji drva i ljepila nastaje spoj kao složeni sustav više materijala. Zbog načina nastajanja on nema jasno definirane granice ni svojstva, te je potpuno jasna činjenica da svaku fazu procesa lijepljenja moramo pomno provoditi, počevši od izbora drva i ljepila, pripreme drva za lijepljenje, provođenja procesa nanošenja i priljubljivanja, pa sve do otvrdnjavanja ljepila.

Kako svaki materijal možemo definirati njegovom otpornošću prema razaranju pod djelovanjem sile (čvrstoćom), i lijepljeni spoj možemo definirati na isti način. Međutim, određivanje čvrstoće lijepljenja drva znatno je složenije od određivanja čvrstoće samo jednog materijala, ponajprije zato što se lijepljeni spoj sastoji od više različitih materijala. Pritom je složenost problematike dodatno povećana jer su površine drva koje dolaze u dodir s ljepilom porozne, pa se penetracijom ljepila stvara potpovršinski sloj drva impregniranog ljepilom, a to je materijal koji ima drugačija svojstva od svojstava drva i ljepila i kojemu zbog neravnomjerne impregnacije drva ljepilom nije moguće odrediti granicu u smislu ravnine kojom bismo razdijelili materijale. Osim toga, ne znamo ni stvarnu površinu na kojoj djeluje adhezija, pa lijepljeni spoj moramo dimenzionalno definirati njegovom ortogonalnom projekcijom.

U svakom slučaju, ako slijepljeni spoj ispitujemo njegovom otpornošću prema razaranju, lomna površina treba biti pozicionirana u njemu ili neposredno uz njega da bismo ga mogli kvalitativno opisati iznosom čvrstoće.

Uzmemo li u obzir sva iskustva koja su znanstvenici stekli istražujući sustave lijepljenja drva, sa sigurnošću možemo tvrditi da lijepljenje drva nikako ne smijemo olako shvatiti. Umjesto rečenice: "Ta dva elementa slijepimo i gotovo", o lijepljenju treba temeljito razmisliti i poslužiti se upitom: "Kako da slijepimo ta dva elementa ako želimo postići zadovoljavajuću razinu kvalitete spoja?" Da bismo to mogli postići, moramo voditi brigu o svim činiteljima koji utječu na čvrstoću i trajnost zalijepljenog drva.

4 LITERATURA 4 REFERENCES

- Blomquist, R. F. 1963: Adhesives - Past, Present, and Future. (priručnik).
- Bodig, J. 1962: Wettability Related to Gluabilities of Five Philippine Mahoganies. *Forest Product Journal*, 12(7):265-270.
- Bogner, A. 1986: Istraživanje tehnologije pročelja iz masivnog drva kod namještaja za pohranu. Magistarski rad. Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet.
- Bogner, A. 1993a: Kvašenje drva i adhezija. *Drvena industrija* 44(4):139-143.
- Bogner, A. 1993b: Modifikacija površine bukovine radi poboljšanja lijepljenja. Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet
- Bogner, A. 1995: Work of adhesion sa a criterion for determination of optimum surface tension in adhesives. *Drvena industrija*, 46(1), 187-194.
- Bogner, A.; Grbac, I.; Mihulja, G. 1999: Zaostala naprezanja u lijepljenim drvnim konstrukcijama. *Drvena ind.* 50(4):185-191.
- Bryant, B. S., 1968: Interaction of Wood Surface and Adhesive Variables. *Forest Product Journal* 18(6):57-62.
- Christiansen, A. W. 1991: How overdrying wood reduces its bonding to phenol-formaldehyde adhesives: A critical review of the literature. Part II. Chemical reactions. *Wood and Fiber Science*, 23(1), 69-84.
- Christiansen, A. W. 1994: Effect of overdrying of Yellow-Poplar veneer on physical properties and bonding. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 52(1994): 58-67.
- Derbyshire, H.; Miller, E.R.; Turkulin, H. (1996): Investigations into the photodegradation of wood using microtensile testing. Part 2: An investigation of the changes in tensile strength of different softwood species during natural weathering. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 54(1):1-6.
- Ebewele, R. O.; River, B. H.; Koutsky, J. A. 1979: Tapered double cantilever beam fracture tests of phenolic-wood adhesive joints. Part I. Development of specimen geometry; effects of bondline thickness, wood anisotropy and cure time on fracture energy. *Wood and Fiber Science*, 11(3):197-213.
- Govorčin, S. 1996: Svojstva juvenilnog i adultnog drva bukovine iz područja Bjelolasice. Doktorska disertacija. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- Hernández, R. E. 1994: Effect of two wood surfacing methods on the gluing properties of sugar maple and white spruce. *Forest Product Journale* 44(7/8):63-66.
- Jirouš-Rajković, V. 1991: Režimi brušenja ravnih furniranih ploha i njihov utjecaj na površinsku obradu. Magistarski rad. Šumarski fakultet Zagreb.
- Jokerst, R. W.; Stewart, H. A. 1976: Knife- versus abrasive-planed wood: Quality of adhesive bonds. *Wood and Fiber Science*, 8(2):107-113.
- Kollmann, F. 1961: Rheologie und Strukturfestigkeit von Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 19(3):73-80.
- Ladlaw, R. A.; Paxton, B. H. 1974: The effect of moisture content and wood preservatives on the assembly gluing of timber. Building Research Establishment Current Paper CP 54/74, str. 1-7.
- Ljuljka, B. i sur. 1978: Lijepljenje u tehnologiji finalnih proizvoda. SIZ odgoja i usmjerenog obrazovanja šumarstva i drvne industrije SR Hrvatske, Zagreb.
- McNamara, W. S.; Waters, D. 1970: Comparison of the Rate of Glue-Line Strength Development for Oak and Maple. *Forest Product Journal* 20(3): 34-35.
- Mihulja, G.; Bogner, A.; Turkulin, H. 1999: Modifikiranje površine bukovine ozračivanjem UV svjetlošću. *Drvena industrija* 50 (3):133-140.
- Murmanis, L.; River, B. H. 1983: Microscopy of abrasive-planed and knife-planed surface in wood-adhesive bonds. *Wood and Fiber Science*, 15(2):102-115.
- Murmanis, L.; River, B. H. 1986: Surface and subsurface characteristics related to abrasive-planing conditions. *Wood and Fiber Science*, 18(1):107-117.
- Pecina, H. 1970: Holzfeuchte und Klebung. *Holz-technologie* 11(1970) 3: 193-198.
- Pentoney, R. E.; Davidson, R. W. 1962: Rheology and the Study of Wood. *Forest Product Journal*, 12(5):243-248.
- Petrović, S. 1980: Prilog istraživanju utjecaja nekih tehnoloških faktora na kvalitetu lijepljenja drva. *Drvena industrija* 31(7-8):181-191.
- Rabiej, R.; Behm, H. D. 1992: The effect of clamping pressure and ortotropic wood structure on strength of glued bonds. *Wood and Fiber Science* 24(3):260-273.
- River, B. H.; Okkonen, E. A. 1991: Delamination of Edge-Glued Wood Panels: Moisture Effects. Limited number of free copies. Madison, WI: U. S. Departement of Agriculture, Forest Service, Forest products Laboratory.
- Schneberger, G. L. 1980: (Basic Concepts of) Adhesive Bonding. *Adhesives Age*. January. 42-46.
- Schniewind, A. P. 1967: Creep-rupture Life of Douglas Fir Under Cyclic Environmental Conditions. *Wood Science and Technology* 1(4):278-288.
- Schniewind, A. P. 1968: Recent Progres in the Study of the Reology of wood. *Wood Science and Technology* 1(1968):188-206.
- Semenov, V. A. 1980: O dugovečnosti kleevyh soedinenij na osnove modifitsirovanoj polivinilacetatnoj dispersij. *Drevoobrab. Prom.* 10:7-8.
- Stehr, M.; Östlund, S. 2000: An Investigation of the Crack Tendency on Wood Surfaces After Different Machining Operations. *Holzforschung* 54(2000):427-436.
- Stumbo, D. A. 1964: Influence of Surface Aging Prior to Gluing On Bond Strength of Douglas-Fir and Redwood. *Forest Product Journal* 14(12):582-589.
- Turkulin, H. 1993: Dauerhaftigkeit von lamellierten Holzfensterprofilen. Teil 2: Untersuchungen zur Delaminierung und zur Leimfugenfestigkeit. *Holz als Roh- und Werkstoff* 51(2):67-71.
- Turkulin, H. 1996: Fotodegradacija proizvoda od drva u gradevinarstvu. Doktorska disertacija. Šumarski fakultet Zagreb.
- Turkulin, H.; Arnold, M.; Derbyshire, H.; Sell, J., 2001: Structural and fractographic SEM analysis of exterior coated wood. *Surface Coatings International, Part B: Coatings Transactions* 84(B1):67-76.
- White, M. S. 1977: Influence of Resin Penetration on the Fracture Toughness of Wood Adhesive Bonds. *Wood Science* 10(1):149-153.

Corresponding address:

Assistant GORAN MIHULJA, MSc

Department for furniture and wood products
Faculty of Forestry, University of Zagreb
P.O. Box 422
10002 Zagreb
CROATIA
mihulja@sumfak.hr