

Goran Mihulja, Andrija Bogner¹

Čvrstoća i trajnost slijepljenog drva

Dio II: Ispitivanje čvrstoće lijepljenja drva

Strength and durability of glued wood Part two: Glue joint strength testing methods

Stručni rad • Professional paper

Prispjelo – received: 14. 12. 2006.

Prihvaćeno – accepted: 5. 6. 2007.

UDK: 630*824.521; 630*824.522

SAŽETAK • U radu su istražene metode i postupci koji se primjenjuju za određivanje čvrstoće i trajnosti slijepljenih spojeva drva. Analizom pojedinih utjecajnih činitelja praćen je razvoj ispitnih metoda. Raspravlja se o današnjim metodama i mogućim novim metodama koje bi se mogle koristiti za ispitivanje kvalitete lijepljenja drva. Navedene su mogućnosti primjene metoda u pogonskim uvjetima, u kojima bi bile od velike koristi u proizvodnji i razvoju novih proizvoda.

Svojstva slijepljenog spoja drva različito se ispituju, ovisno o smjeru djelovanja sile. Uglavnom se čvrstoća ispituje opterećivanjem na smik kao najpogodnijim načinom primjene opterećenja.

Ključne riječi: slijepljeni spoj, tip i oblik probe, čvrstoća lijepljenja, lomna površina, deformiranje proba

SUMMARY • This paper presents the results of investigation of methods for testing wood gluing strength. Development of testing methods has been presented through the analyses of factors affecting the results of testing. The existing standard test methods have been discussed as well as the development of new testing methods. The possibilities of using the methods will be of great benefit in production and new product development.

The properties of glued wood can be determined in different ways depending on the force direction. Usually the strength is tested by using the shear force as the best way of application.

Key words: glued joint, type and shape of specimen, gluing strength, surface failure area, specimen deformation.

1. UVOD 1 INTRODUCTION

Razvijanjem različitih sustava veziva za sljepljivanje drva pojavila se potreba njihova uspoređivanja, što je dovelo do normiranih sustava za ispitivanje čvrstoće lijepljenja. Unutar tih sustava ispitivanje čvrstoće lijepljenja drva provodi se radi definiranja vrijednosti pojedinog sustava lijepljenja te zato da bi se ta znanja mogla primijeniti kada se trebaju očitovati posebnosti

poput načina vezanja, te mehaničkih i fizičkih svojstva slijepljenog spoja.

1.1. Svojstva slijepljenih spojeva 1.1 Properties of glued bonds

Osnovna svojstva slijepljenog spoja definirana su njegovom čvrstoćom i trajnošću. Čvrstoća spoja ovisi o čvrstoći lijepljenja i o načinu na koji je spoj izrađen. Čvrstoća lijepljenja i činitelji koji utječu na formiranje spoja opisani su u prethodnom radu (Mihulja i Bogner,

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

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

2005). Način na koji je spoj izrađen i činjenica da on ima neku namjenu razlikuju čvrstoću lijepljenja od čvrstoće slijepljenog spoja. Čvrstoća slijepljenog spoja jest čvrstoća konstrukcije koju čini taj spoj, koji je uglavnom pod utjecajem sila što mogu prouzročiti razdvajanje. Pri tome konstrukcija slijepljenog spoja definira područje lijepljenja i način opterećenja.

Tri su osnovna načina prenošenja opterećenja među dijelovima adhezijski vezanog spoja:

- I – otvaranje (cijepanje),
- II – u ravnini smicanja,
- III – kidanje (trganje) ili nasuprotni (transverzalni) mod.

Smjer djelovanja opterećenja važan je za slijepljene spojeve jer se pravilnim spajanjem drvnih elemenata u konačnici mogu dobiti bolja svojstva sustava nego da je element izrađen od cjelovitog drva. Visoka čvrstoća spojenih drvnih elemenata posljedica je građe drva koje je po prirodi anizotropan materijal. Podudaranjem dobrih svojstava određenog elementa, može se povećati čvrstoća sustava u jednom smjeru, u odnosu prema drugom elementu spoja, koji će imati bolja svojstva u drugom smjeru. Međutim, ako elemente pogrešno izradimo i slijepimo, moguća su dodatna naprezanja u sustavu zbog dimenzionalnih promjena koje uvijek postoje u drvu u upotrebi, i to ponajprije zbog promjena sadržaja vlage, a manje zbog promjene okolne temperature. Slijepljeni drveni elementi pri promjeni sadržaja vlage mijenjaju reološka, pa čak i mehanička svojstva (Marra, 1962).

Važnost bubrenja i utezanja u konstrukcijama od cjelovitog drva iznimno je velika, a posebno treba naglasiti nastajanje tlaka bubrenja, koji može prouzročiti oštećenja konstrukcije ako se rješenja sastavljanja ne prilagode očekivanim promjenama dimenzija u sastavljenoj konstrukciji (Tkalec i Prekrat, 2000).

Svi su slijepljeni sustavi složene strukture, i u njima na čvrstoću (ili bilo koji drugi kriterij ocjenjivanja) utječu tri karakteristične komponente: kohezija u sloju ljepila, postignuta veza lijepljenja (adhezija) te čvrstoća slijepljenih dijelova. Svaki činitelj koji mijenja neku od tih komponenti promijenit će promatranu vrijednost, osim ako interakcije ne neutraliziraju taj učinak.

Raznolikost građe drva ima velik utjecaj na njegova svojstva. Tako je čvrstoća drva najslabija u smjeru aksijalnoga provodnog staničja (sržni trakovi), koje je znatno manje čvrstoće nego okolno nosivo staničje (traheide). Stoga se može očekivati da će se lom drva inicirati u sržnim trakovima odnosno u parenhimskom staničju. Ako pak lom započne na nekom drugome mjestu unutar drva i/ili na njegovoj površini, tada će se vjerojatno nastaviti odnosno širiti najlakšim smjerom. Stoga je vrlo važno da elementi građe drva u odnosu prema sili opterećenja budu orijentirani tako da mogućnost nastanka odnosno širenja loma parenhimskim staničjem bude svedena na što manju mjeru.

Jednako je važna i druga oslabljena zona drvne tvari, rano drvo. Zbog svoje prirodne uloge provodnog staničja u vrijeme bujanja vegetacije, rano drvo ima znatno veće lumene i tanje stanične stijenke. Takva je

građa tkiva mehanički slabije područje i time osjetljivije na opterećenja. Između tih dviju mehanički slabijih zona postoji bitna razlika, a to je upravo pojam zone, koju ne možemo nazvati zonom parenhimskog staničja. Ono fizički ne čini zonu ni u jednoj ravnini presjeka, već samo presjeke s povećanim udjelom parenhima. Rano drvo, pak, stvara zone u elementima odnosno u njihovim ravninama, i to tako da je zona veća ako je element manji te udaljeniji od srčike jer tangenti presjek zbog većeg radijusa linije goda na površini presjeka ima veći udio ranoga ili kasnoga goda.

Smjer djelovanja opterećenja važan je pri svim načinima opterećivanja. Stoga bi slijepljene spojeve trebalo promatrati odnosno uspoređivati pri točno definiranim načinima spajanja. Čvrstoću lijepljenja treba ispitivati kada drvo daje najveći otpor širenju loma, odnosno kada je slijepljeno tako da se primjenom određenog smjera djelovanja sile ispitni spoj ili proba naprezanja koncentrirana na sljubnicu.

U zoni lijepljenja drva pri smičnom naprezanju postoje različite kombinacije slijepljena spoja s obzirom na smjer vlakana. Vlakana mogu biti paralelna s ravninom smicanja, ali i zakrenuta prema njoj u svim smjerovima. Čvrstoća slijepljenih spojeva na smicanje općenito se smanjuje zakretanjem smjera vlakana u bilo kojoj ravnini (Świetliezny, 1980).

Vrsta drva utječe na raznolikost njegovih svojstava. Neka su istraživanja pokazala da vrsta drva utječe na slijepljeni spoj tek nakon njegova kuhanja (Bandel, 1997). Druga istraživanja pokazuju da je vrsta drva dominantni činitelj pri ispitivanju kvalitete lijepljenja tlačno smičnim metodama (Okkonen i River, 1988).

Slijepljeni je spoj zbog posebnosti drva iznimno ovisan o svojstvima upotrijebljenog ljepila. Naime, iako slobodni film ljepila ima ograničenu čvrstoću na vlak, otvrdnulo ljepilo u sljubnici može ograničiti bubrenje drva (Perkitny i Jablonski, 1979).

Opsežna istraživanja elastomehaničkih svojstava ljepila u sljubnici proveo je W. Clad (1965) na uzorcima otvrdnulog ljepila u obliku cijevi i na slijepljenim drvenim uzorcima. Pri ispitivanju ljepila mjereni su parametri slijepljenih uzoraka poput veličine smicanja, a uz ostalo mjerena su, i naprezanja na torziju. Prema tom istraživanju, najniži modul smicanja imaju PVAc i glutinsko ljepilo. Bolji modul smicanja imaju fenolno, rezorcinsko i kazeinsko ljepilo. Najviše vrijednosti imaju karbamidna i melaminska ljepila.

Čvrstoću spoja koju teoretski određujemo naprezanjem na smicanje u praksi često provodimo vlačnim naprezanjima, naprezanjima na savijanje ili kombinacijama tih naprezanja. Stvarni odnos čvrstoće na smicanje i čvrstoće na vlak, odnosno na savijanje, nije potpuno razjašnjen ni za jedan tip odnosno oblik probe.

Kada se proba za testiranje slijepljenog spoja optereti do loma, važno je znati da se lom može pojaviti u sloju ljepila, u drvu ili na liniji njihova dodira, odnosno u međusloju. O intenzitetu i smjeru nametnutog naprezanja, te o najslabijemu mjestu ovisi gdje će se pojaviti lom. Tako se putem varijabilnosti rezultata reflektira

varijabilnost mehaničkih svojstava drva, ljepila i sučelja drvo - ljepilo.

Drvo je po prirodi materijal s varijabilnim svojstvima, i to po svojem fizičkom izgledu i ponašanju. U probi za testiranje slijepljenog spoja najveću važnost imaju efekti variranja anatomskih obilježja, volumne mase, sadržaja vode, položaja godova i smjera žice u drvu.

Za ljepilo je u trenutku testiranja važan postignuti stupanj stvrdnosti ili krutosti, koji će odrediti je li film ljepila podatan ili krt, te time utjecati na raspodjelu naprezanja pri opterećenju. Usto, ljepilo ima prirodnu tendenciju skupljanja dok otvrdnjava, a sila otpora koja se pri tome pojavljuje u drvu vodi dodatnom napreznju u sloju ljepila (Bogner i sur., 1999).

Naprezanja koja nastaju u materijalima pri njihovom sljepljivanju mogu se podijeliti na privremena i trajna. Iako ih nazivamo trajnima, veličine tih naprezanja mijenjaju se tijekom vremena uglavnom zbog činitelja koji uzrokuju njihov nastanak. Naprezanja najčešće nastaju zbog promjena temperature te zbog bubrenja i kontrakcije volumena pri promjeni vlažnosti drva. Izračun unutrašnjih naprezanja izuzetno je složen, pa ih je jednostavnije eksperimentalno ustanoviti.

Na čvrstoću sučelja drvo - ljepilo djeluju i kemijski i fizikalni činitelji u drvu i u ljepilu (Yavorsky i sur., 1955). To podrazumjeva polarnost drva i ljepila, njihove površinske energije, postojanje bilo kakvih nečistoća, hrapavost površine drva, anatomiju i izgled vlakana, viskoznost ljepila. Ti se izvori varijabilnosti odnose na sve oblike proba za ispitivanja slijepljenog spoja. Ostali izvori varijabilnosti odnose se na pojedine vrste proba, ovisno o geometriji i metodi opterećenja.

Nagle promjene na presjeku, poput zareza, uzrokuju velika koncentrirana naprezanja. Pojava zakretnog momenta zbog ekscentričnih opterećenja i male promjene u dimenzijama neodgovarajućih proba često pridonose velikoj raznolikosti tipova naprezanja koja djeluju na slijepljeni spoj. Stoga ne bi trebala iznenaditi pojava vrlo složenog rasporeda naprezanja na uobičajenim oblicima proba.

Kako se razni autori u svojim istraživanjima koriste raznim oblicima proba, ne može se odrediti njihova međusobna povezanost bitna za usporedbu rezultata, ali je jasno da oblik probe treba što vjernije odgovarati praktičnoj upotrebi.

Opsežna komparativna istraživanja različitih metoda ispitivanja slijepljenih spojeva proveo je Strickler (1968). Uspoređivao je ispitivanja na ovim uzorcima:

- na uzorku za blok posmično naprezanje prema ASTM D 905,
- na uzorku za ispitivanje na smicanje vlačnim silama,
- na uzorku za ispitivanje na smicanje tlačnim silama,
- na uzorcima za cijepanje ASTM D 143-52,
- na uzorcima za cijepanje klinom uz podmazivanje,
- na uzorcima za cijepanje klinom i kliznim pločama,
- na uzorcima za cijepanje vlačnim silama.

Uspoređivane su pojedine metode, njihova prikladnost za određivanje početne čvrstoće te prikladnost za ispitivanje trajnosti (čvrstoće nakon izlaganja raz-

ličitim utjecajima) slijepljenih spojeva. Glavni zadatak tog istraživanja jest pitanje koje probe više utječu na postojanost ravnine lijepljenja - one za ispitivanje smikom ili one opterećivane okomito na smjer vlakana, a je li jedno od tih opterećenja, potrebno da bi se osigurala pouzdanost mjerenja postojanosti slijepljenog spoja, ili su to oba.

Ispitni postupci kojim se slijepljeni spoj opterećuje u smjeru okomito na sljubnicu mogu se klasificirati na dva načina - kao postupci koji prividno razvijaju naprezanje jednoliko preko područja lijepljenja, ili kao postupci koji naprezanje koncentriraju na jedan rub probe.

Te testove analiziramo zbog očite razlike u čvrstoći između smika i naprezanja okomito na smjer vlakana, koja proizlazi iz sadržaja vlage u drvu u vrijeme testa. Pri smičnom testu vlažni blok uzorci daju upola manju čvrstoću nego kada su osušeni na 10 % vlage. Taj izraziti gubitak smične čvrstoće pri povećanoj vlažnosti dobro je poznato svojstvo drva. Nasuprot tomu, čvrstoća pri opterećenju okomito na smjer vlakana ostaje postojana za vrijeme promjene vlažnosti drva.

Niz istraživanja poprečno (križno) slijepljenih proba vlačno napregnutih okomito na smjer vlakana proveo je Marra (1962). U takvog oblika proba pojavljuju se složena naprezanja. Kako bi se razjasnile interakcije, na križno slijepljeni uzorak utjecao je dvjema geometrijskim modifikacijama. Utjecaji promjene debljine probe i površine lijepljenja na promatranu čvrstoću upućuju na postojanje dodatnih činitelja reološke prirode, koji kontroliraju velik dio ukupne čvrstoće. Rezultati mjerenja čvrstoće pri promjenama površine lijepljenja blokiranjem različitih dijelova spoja silikonskim mazivom potvrđuju važnost reologije ljepila, posebno njihovu sposobnost raspodjele naprezanja u sve dijelove spoja.

Poprečno slijepljeni uzorci tvore spojeve veće čvrstoće kada su ispitivani pri nešto višem sadržaju vlage od onoga u vrijeme lijepljenja, jer bubrenje drva koje pritom nastaje smanjuje unutarnja naprezanja. Postojanje unutarnjih naprezanja sigurno mora utjecati na čvrstoću spoja, odnosno povećavati ili smanjivati naprezanja uzrokovana ispitnom silom. Prema tome, u križno slijepljenom uzorku, kao i u većini slijepljenih uzoraka, postoji niz kombiniranih činitelja koji mogu otežati čak i usporednu analizu. Tako velike razlike u čvrstoći spoja često nastaju isključivo zbog činitelja koji ne pripadaju kvaliteti lijepljenja već, primjerice, geometriji spoja i reološkim pojavama (Marra, 1962).

Probe za tlačno opterećivanje spoja smikom znatno su manje osjetljive na promjenu modula elastičnosti drva zbog vlaženja nego probe za vlačno opterećivanje okomito na ravninu kojom se prostiru vlakana (Carroll i Bergin, 1967).

Analize su pokazale da zbog deformacije proba izrađenih preklapanjem nastaju naprezanja okomita na površinu sljuba, koja imaju veći utjecaj od smičnih naprezanja. Taj efekt uzrokuje rano pucanje takve veze nego na blok smičnim probama s čak upola manjim vri-

jednostima čvrstoće. Isti se problem pojavljuje s tlačno smičnim probama. Iako blok smične probe ne razvijaju isključivo smicajno naprezanje, one imaju najveći udio smičnog naprezanja (Strickler, 1968).

Naprezanje unutar spoja pod opterećenjem nije jednoliko, posebno pri cijepanju i raslojavanju. Obično počinje maksimalnim iznosom na krajevima ili na oštrim rubovima, sve do minimalnoga blizu sredine spoja. Iz toga proizlazi da prosječno naprezanje nije odgovorno za lom, već je to lokalno koncentrirano naprezanje koje dosegne čvrstoću drva ili veze drvo - ljepilo (Northcott, 1955).

Kada probe čije je središte ispitne površine u 50 - postotnom iznosu prekriveno parafinom, da ljepilo u tom dijelu ne bi djelovalo usporedimo s onima koje su slijepljene cijelom ispitnom površinom, moguće je utvrditi da ne postižu 50 % manje sile loma (Yavorsky i sur., 1955). Iako statistički postoji signifikantna razlika između proba s 50% ispitne površine i onih kontrolnih, time je dokazano da opterećenje nije ravnomjerno raspoređeno te da je naprezanje na krajevima mnogo veće. Kako krajevi preklopa nose najveći dio sile, očito je da se s povećanjem širine povećava i čvrstoća spoja, dok je povećanje duljine smanjuje.

Maksimalna čvrstoća mjerena na suho za preklopni oblik proba raste do određenog iznosa porasta temperature pri vezanju, a zatim naglo pada. Pri vlažnom mjerenju postižu se približno jednaki iznosi čvrstoća, ali tek pri višim temperaturama (Carroll i Bergin, 1967).

Slijepljeni spojevi, i njihovi elementi zasebno, podložni su učestalim promjenama vlažnosti, temperature, opterećenja te djelovanju svjetlosti i kemijskim utjecajima, pri čemu slijepljeni spoj stari, odnosno postupno mijenja svoja svojstva.

Probe namijenjene mjerenju čvrstoće nakon podvrgavanja cikličkim tretmanima ubrzavanja starenja trebale bi barem u jednoj dimenziji biti 1/2" (12,7 mm), kako drvo pri tim tretmanima ne bi propadalo brže nego slijepljeni spoj (Strickler, 1968). Tako su površina smika od 1" na 1" (25,4 mm na 25,4 mm) i lamele debljine 5/16" (7,94 mm) optimum za testove ubrzanog starenja pri procjenama trajnosti slijepjenog spoja.

Čvrstoću lijepljenja drva najbolje je ispitivati smikom (Ebewele i dr., 1979), iako postoji mnogo problema na koje su upozorili brojni autori.

1. Koncentracija naprezanja unutar probe nejednolika je, što je uzrokovano njezinom geometrijom i metodom opterećivanja.
2. Svojstva probe da očituje stvarno stanje spoja koji se testira može više ovisiti o raspodjeli naprezanja okomito na probu nego o varijablama koje se ispituju.
3. Lom proba za testiranje može biti potaknut unutrašnjim naprezanjem umjesto djelovanjem sile opterećenja pri testiranju.
4. Velik udio loma po drvu pokazatelj je čvrstog spoja, ali je postotni udio tog loma jedini kriterij koji je upitan jer naprezanje na cijepanje u takvih proba obično nije kontrolirano.

5. Mnoge probe pri preklopnom smičnom testiranju za postizanje pouzdanih rezultata zahtijevaju statistički značajan rezultat, jer neki činitelji, poput nagiba žice koje je iznimno teško kontrolirati, rezultiraju složenijim procesom loma.

1.2. Određivanje kvalitete spoja pri ispitivanju smikom

1.2 Quality determination by shear testing

Čvrstoća slijepjenog spoja ili čvrstoća loma najvažnije je i najnužnije kvalitativno svojstvo svakog ljepila. Čvrstoća loma označuje maksimalnu čvrstoću na smicanje u smjeru vlakana drva. Čvrstoća slijepjenog spoja dvaju drvnih elemenata mora biti jednaka ili veća od čvrstoće na smicanje samog drva, jer inače nastaje lom po ljepilu. Uz kvalitetno ljepilo lom se pojavljuje u međusloju drvo - ljepilo, tzv. adhezijski lom.

Mogućnosti ili ponašanje adheziva ovise o širokom rasponu činitelja. Neki su povezani sa sustavom, primjerice hrapavost površine, pH, postojanje ekstraktivnih tvari i iznos ili količina nečistoće (krhotina, prašine) te ostalih činitelja vezanih za različite utjecaje, poput veličine i učestalosti promjene temperature i relativne vlažnosti.

Dva su temeljna pristupa procjeni mogućnosti adheziva. Prvi se temelji na primjeni tankih filmova adheziva, a drugi na uporabi standardnih supstrata (proba) i uvjeta testiranja. Ako vrednujemo svojstva i mogućnosti adheziva zasebno, varijable koje se odnose na supstrat trebaju biti konstantne, a ako se ocjenjuju mogućnosti slijepjenog spoja u drvnim lijepljenim proizvodima, moraju se uzeti u obzir učinci supstrata.

Idealan slijepljeni spoj dvaju elemenata od drva nastao bi vezanjem međusobno priljubljenih stanica jednog elementa uz stanice drugoga tankim slojem ljepila. Današnjom se tehnologijom ne može tako kvalitetno obraditi površina, pa sloj ljepila u sljubnici ima zadaću popunjavanja neravnina, bez obzira na njihovu veličinu. Debljina sloja ljepila u spoju znatno varira te zbog toga ljepilo svojim fizikalnim i mehaničkim svojstvima mora što više sličiti drvu, kako bi se spojevi pri dimenzionalnim promjenama karakterističnim za drvo što manje razlikovali. Glavni su činitelji temperatura i svakodnevna promjena vlažnosti, što kontinuirano mijenja dimenzije.

Krta i dimenzionalno stabilna ljepila mogu izazvati unutrašnja naprezanja u spoju, posebno zbog spomenutoga kontinuiranog mijenjanja dimenzija drva. Velika unutrašnja naprezanja uzrokuje pukotine, koje se zatim takvim spojem krto materijala i drva vrlo brzo šire, pri čemu lom nerijetko završi kohezivnim lomom inače vrlo čvrstog materijala.

Brzina porasta opterećenja utječe na čvrstoću slijepjenog spoja, sukladno reološkim svojstvima ljepila. Što je viskoelastičnost ili plastičnost ljepila veća, veći je utjecaj promjene brzine porasta opterećenja pri ispitivanju. Termoreaktivna ljepila, poput fenol - formaldehidnih, elastična su. Čvrstoća spoja izvedenog takvim ljepilima može se mjeriti brzinama od 0,038 do 1,27 cm/min, bez uočljivih promjena izmjerenih vrijednosti. Termoplastična ljepila, poput polivinil acetatnih i onih

na bazi elastomera, imaju velik raspon elastičnosti, viskoelastičnosti i plastičnosti. Čvrstoća spojeva s takvim ljepilima ovisit će o promjeni brzine opterećivanja. Općenito se s povećanjem brzine opterećenja povećava i čvrstoća.

U većini procjenjivanja kvalitete lijepljenja drva kriterij kojemu treba težiti jest da slijepljeni spoj treba biti jednak ili čvršći od drva (Yavorsky i sur., 1955). Nekim se ljepilima postižu vrlo visoke čvrstoće prije loma, a da se lom ipak pojavi u sloju ljepila, a ne kroz drvo. Stoga se postavlja pitanje je li takav slijepljeni spoj prihvatljiv ili nije. Vrijednosti loma kroz drvo mijenjaju se sa sadržajem vlage i kreću se od 0 % pri niskom sadržaju vlage do 20-30 % pri višim sadržajima vlage, s nekim naznakama maksimuma pri srednjim vrijednostima. Prema tome, lom kroz drvo ne može biti bezuvjetan pokazatelj kvalitete spoja (Marra, 1962).

Neka su istraživanja mehaničkih testova slijepljenih spojeva engleskog Odjela za znanstvena i industrijska istraživanja utemeljena isključivo na sili loma. Važnost loma u drvu minimalizirana je uz objašnjenje da veći lom kroz drvo nije moguć ako se upotrijebi kvalitetan uzorak sa smjerom žice drva paralelnim s površinom. Američki Forest Product Laboratory 1919. godine također iznosi podatke o ispitivanju metodama smičnog naprezanja, ne spominjući lom kroz drvo. Tek je 1929. godine američki istraživač T. R. Truax iznio ideju o vrednovanju slijepljenog spoja na temelju udjela loma kroz drvo nakon mehaničkog opterećivanja do loma (Northcott, 1955).

Prema tadašnjim spoznajama, Northcott je 1955. godine zaključio da, unatoč teškoćama zbog nedovoljnog poznavanja rasporeda naprezanja u trenutku loma, ta metoda ipak daje rezultate korisnije u ocjenjivanju kvalitete lijepljenja od metode koja se temelji samo na veličini udjela loma kroz drvo.

Izmjerena čvrstoća u nekim primjerima može, ali ne mora, biti pogodan kriterij za određivanje kvalitete spoja. Lom može nastati zbog različitih činitelja, poput intenzivne deformacije, delaminacije, gubitka konzistentnosti ili niza drugih činitelja koji nisu izravno povezani s maksimalnom čvrstoćom.

Ocjena kvalitete lijepljenja može se određivati terminima relativnog iznosa destrukcije adheziva i drva ili potrebnog naprezanja koje uzrokuje destrukciju pri određenom mehaničkom opterećenju. Kvaliteta lijepljenja u prvom se primjeru procjenjuje vizualno, uzimanjem u obzir relativne količine drva i ljepila na lomnoj površini, a u drugom se primjeru određuje prema iznosu čvrstoće spoja uz pomoć podataka o silama izmjenjenim u trenutku loma. Pri preciznijoj procjeni kvalitete moraju se uzeti u obzir oba gledišta. Čvrstoća će davati približno točne iznose ako analizom površine loma izuzmemo one probe koje imaju neodgovarajuću lomnu površinu.

Mjesto iniciranja loma i način njegova širenja važni su pokazatelji pri analizi površine loma kojom se određuje funkcionalnost pojedine probe. Lom po drvu kvalitativni je pokazatelj kvalitete slijepljenog spoja. Ako su uzorci za ispitivanje čvrstoće slijepljenog spoja

pravilno izrađeni, naprezanje će se koncentrirati u sljubnici ili neposredno uz nju. Takav lom kroz drvo upozorava na to da je čvrstoća slijepljenog spoja znatno veća od čvrstoće drva. Zbog nepravilne raspodjele naprezanja (npr. u neadekvatnim ili loše izrađenim probama), tj. zbog moguće koncentracije naprezanja u drvu - izvan sljubnice - lom može započeti u zoni drva. Ovisno o raspodjeli naprezanja, lom se širi od najslabije točke (npr. od lumena traheja, velikog lumena traheide, mjehurića ili pukotine u sloju ljepila, mjesta slabe adhezije zbog nečistoće, mehaničkog oštećenja itd.) po području naprezanja. Ako naprezanja nisu koncentrirana strogo na sloj ljepila ili na područje međusloja, lom može započeti i širiti se u drvu. Ako čvrstoća spoja i međusloja nije znatno veća od čvrstoće drva (često pri smicajnim opterećenjima, pogotovo na malim površinama sljubnice), može se dobiti pogrešna slika o čvrstoći lijepljenja.

Daljnje povećanje pouzdanosti u određivanju kvalitete lijepljenja moguće je samo metodama u kojima su poznati svi utjecajni činitelji i iznosi njihova udjela u stvaranju odnosno mjerenju sile loma.

Neki od najvažnijih činitelja koji uzrokuju varijacije rezultata jesu:

1. Činitelji vezani za geometriju ispitnih proba i metode opterećenja:
 - a. ekscentričnost probe,
 - b. dubina zarez, a,
 - c. neporavnost ispitnih hvataljki,
 - d. udaljenost između hvataljki,
 - e. pritisak ispitnih hvataljki.
2. Činitelji vezani za anatomiju i fizička svojstva drva:
 - a. smjer žice na licu probe,
 - b. orijentacija mikropukotina,
 - c. specifična težina i sadržaj vode,
 - d. elastična svojstva drva

Tim izvorima varijabilnosti zajedničko je da djeluju na raspodjelu i jačinu naprezanja nametnutog ispitnoj površini slijepljenoga spoja (Yavorsky i sur., 1955).

Jedan od važnih pokazatelja kvalitete slijepljenog spoja, utemeljen na mjerenju sile loma, jest normativna čvrstoća, koja se može predočiti jednadžbom:

$$\tau_n = \bar{\tau} - 2 \cdot s \quad (1)$$

pri čemu je:

$\bar{\tau}$ – prosječna čvrstoća spoja na smik

s – procjena standardne devijacije.

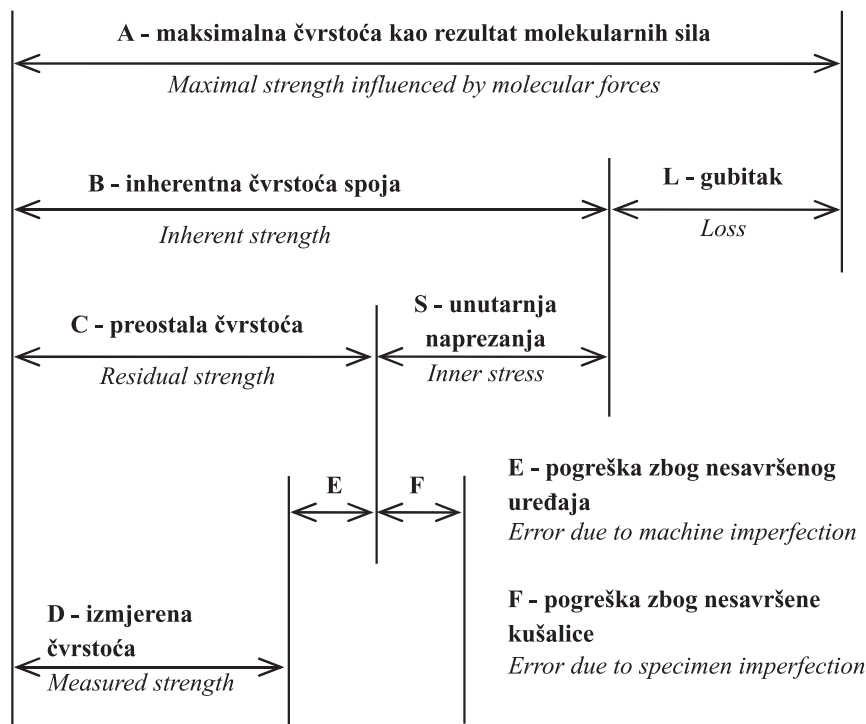
Ako je rasipanje manje, spoj je ujednačeniji. Stavimo li normativnu čvrstoću u omjer s prosječnom čvrstoćom na smik, možemo napisati jednadžbu (Bogner, 1993):

$$U = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}} \quad (2)$$

pri čemu je:

U – činitelj ujednačenosti čvrstoće.

Testovi čvrstoće lijepljenja izrađeni su za potrebe istraživanja ili kontrole kvalitete. Svaka od tih primjena ima brojne zajedničke zahtjeve, ali i svoje posebnosti. Točnost je, primjerice, osnovni zahtjev za sva istraživa-



Slika 1. Odnosi između apsolutne i realne čvrstoće (Kollman i sur., 1968)
Figure 1 Relation between absolute and real strength

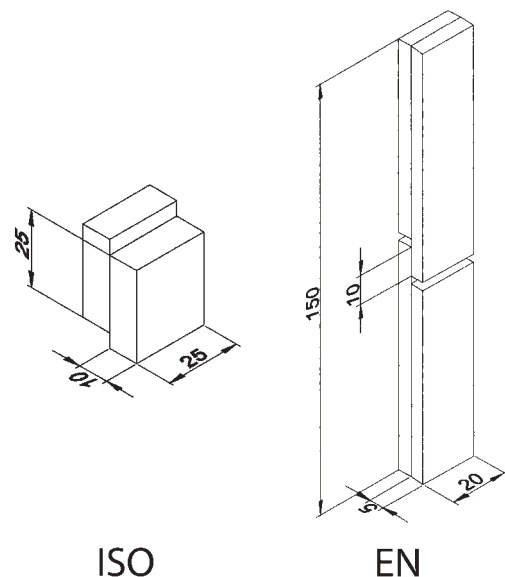
nja. Ponekad točnost jednog mjerenja nije ključna jer se izračunavanjem srednje vrijednosti više mjerenja dobije točniji rezultat, a test možemo provesti na pogodniji način. Drugi kriteriji za uspješnost nekog testa jest njegova ponovljivost, a iznos čvrstoće treba biti osjetljiv na promjene svojstava materijala u konstrukciji.

1.3. Norme za ispitivanje smikom

1.3 Shear testing standards

Metode koje se temelje na ispitivanju čvrstoće lijepljenja drva smikom općenito možemo podijeliti prema osnovnoj razlici u smjeru djelovanja sile. U jednih se metoda sila primjenjuje tlakom na ispitnu probu, a u drugih vlakom. Osnovna polazišta za vlačne primjene jesu europska norma EN 204, odnosno DIN 204, iz kojega je nastala spomenuta norma, a za tlačna ISO 6238, odnosno ASTM D-905, iz koje je nastao spomenuti ISO. Osim tih, potrebno je navesti i JUS H.K.8.024 te GOST 3056, koji se u nekim detaljima razlikuju od spomenutih normi EN i ISO. JUS je vrlo sličan EN 204, ali su probe previše kratke pa se pojavljuje nepoželjno klizanje u čeljustima mjerne opreme. GOST je po dimenzijama preklopa i načinu djelovanja sile vrlo sličan normi ISO, uz neke neznatne razlike zbog kojih se pojavljuje veći broj nepoznanica pri ispitivanju (kuglični ležaj), a nužna je i složenija alatna oprema za izvođenje operacije kidanja. Kako su razlike između ta dva sustava u nekim dijelovima prilično velike (npr. oblik ispitne probe, potrebno ih usporediti (slika 2).

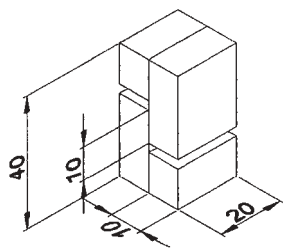
Sustavi i procedura za izvođenje tih ispitivanja izuzetno su složeni i namijenjeni su provođenju u laboratorijskim uvjetima. Da bi se mogla provoditi u pogonima, takva se ispitivanja moraju pojednostavniti, što se posebno odnosi na opremu za opterećivanje proba.



Slika 2. Usporedba oblika ispitnih proba izrađenih prema ISO 6238 i EN 205 normi

Figure 2 Analogy between test specimens according to ISO 6238 and EN 205 standards

Postoje i metode s alternativnim tipovima/oblicima proba poput onoga sa slike 3, primjenjivanog u nekim istraživanjima (Bousquet, 1970; Bogner, 1993; i dr.), a neka je vrsta sinteze tih dviju normi. Glavni nepovoljni utjecaj u tog tipa probe posljedica je nepovoljne geometrije, koja raspoređuje naprežanja i pridonosi tome da se glavno opterećenje odmiče od željenog mjesta pojave pukotine. Tada se lom širi drvom i rezul-



Slika 3. Alternativni oblik ispitne probe
Figure 3 Alternative shape of test specimen

tat ne prikazuje čvrstoću slijepljenog spoja već čvrstoću tako opterećenog drva.

2. DISKUSIJA I ZAKLJUČCI 2 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Drvo zbog svoje anizotropnosti pokazuje brojne varijabilnosti. Stoga možemo zaključiti kako je odlučujući parametar koji definira ponašanje proba za ispitivanje čvrstoće lijepljenja svakako reologija drva. Tako se zbog male promjene oblika probe, koja proizlazi iz specifične građe drva, mogu pojaviti znatne promjene u ponašanju spoja.

U procesima izrade spoja lijepljenjem odnosno otvrdnjavanjem ljepila formira se složeni sustav materijala određenih svojstava. Kako se čvrstoća materijala definira njegovom otpornošću prema destrukciji pod djelovanjem sile, tako i nastali slijepljeni spoj možemo definirati na isti način. Međutim, određivanje čvrstoće slijepljenog spoja znatno je složenije od određivanja čvrstoće samo jednog materijala, u ponajprije zato što se spoj sastoji od više različitih materijala. Pritom je složenost problematike dodatno povećana jer su površine drva koje dolaze u dodir s ljepilom porozne tako da se prodorom ljepila stvara novi materijal kojemu nije moguće odrediti granicu u smislu ravnine kojom bismo razdijelili materijale. Osim toga, to je svojstvo ograničavajuće, jer stvarna površina na kojoj djeluje adhezija nije utvrđena, pa se slijepljeni spoj mora dimenzionalno definirati ortogonalnom projekcijom mjerenog uzorka.

Ostaje upitno koliko se metodama za ispitivanje realno procjenjuju procesi naprezanja u slijepljenim konstrukcijama. One se ponajprije odnose na dimenzije proba koje moraju biti takve da nastane lom te da se na temelju izmjerene sile loma i udjela loma po drvu odredi zadovoljava li ljepilo minimalne uvjete.

Lom drva vrlo je česta pojava u kvalitetno slijepljenim spojevima. Iako je velik udio loma kroz drvo najčešće poželjan, kada se pojavi, izmjerena je čvrstoća niža od stvarne čvrstoće spoja, a standardiziranim metodama analize lomne površine ne možemo dokazati kvalitetu slijepljenosti. To bi bilo moguće pri definiranju utjecaja svih negativnih činitelja, što za slijepljene spojeve drva ne možemo sa sigurnošću utvrditi.

Razmatrana je problematika iznimno važna za struku, a postoji raznolikost u pristupu ispitivanju čvrstoće lijepljenja drva na smik u dva najveća svjetska sustava normizacije, EN i ISO. Ta činjenica upućuje na potrebu istraživanja međusobnih odnosa rezultata dobi-

venih iz različitih sustava kontrole kvalitete, te je stoga potrebno učiniti sljedeće:

- Provesti istraživanje koje bi obuhvatilo sustave i EN i ISO normi s područja ispitivanja čvrstoće lijepljenja drva na smik, tj. glavne utjecajne činitelje pri lijepljenju i testiranju. Rezultat bi trebala biti nova rješenja, prije svega u funkciji poboljšanja kvalitete tumačenja rezultata dobivenih tim načinima ispitivanja.
- U istraživanje treba uvesti neku alternativnu metodu koja ima teoretske mogućnosti i podlogu u prijašnjim istraživanjima vezanim, za kvalitetno opterećenje slijepljenog spoja.
- Uvesti metodu analize lomne površine koja bi pogodovala kvaliteti interpretacija rezultata mjerenja jer bi se mogle uočiti sve pogreške nastale u procesu pripreme površine i lijepljenja, nastanka i širenja loma te penetracija ljepila odnosno opće stanje spoja.

Takva bi istraživanja omogućila kvalitetnija ispitivanja čvrstoće lijepljenja i razvijanje pouzdanije metode koja bi tada kao nova hrvatska norma opravdano zamijenila danas prihvaćenu Europsku normu.

3. LITERATURA 3 REFERENCES

1. Bandel, A., 1997: A report on the influence of the wood species in the gluing of African woods with dispersion adhesives for the production of stripped panels. XYLON International. Januar-February. 80-83.
2. Bogner, A., 1993: Modifikacija površine bukovine radi poboljšanja lijepljenja. Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet
3. Bogner, A.; Grbac, I.; Mihulja, G., 1999: Zaostala naprezanja u lijepljenim drvnim konstrukcijama. Drvna industrija, 50(4):185-191.
4. Bousquet, D. W., 1970: Preliminary Study of a Notched Compression Shear Test Specimen. Forest Prod. J. Technical Note 20(4):29-30.
5. Carroll, M. N.; Bergin, E. G., 1967: Catalyzed PVA Emulsions As Wood Adhesives. Forest Products Journal, 17(11):45-50.
6. Clad, W., 1965: Über die Fugenelastizität ausgehärteter Leimfugen bei Holzverleimungen. Holz als Roh- und Werkstoff, 23(2):58-67.
7. 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.
8. Kollman, F. P.; Cote, W. A., 1968: Principle of Wood Science and Technologie. Solid Wood. New York.
9. Marra, A. A., 1962: Geometry as an Independent Variable in Adhesive Joint Studies. Forest Products Journal. February.
10. Mihulja, G.; Bogner, A., 2005: Čvrstoća i trajnost lijepljenog drva. Dio 1: Činitelji čvrstoće lijepljenog drva. Drvna industrija, 56(2): 69-78.
11. Northcott, P. L., 1955: Possibilities of the Glueline-Cleavage Test When Applied to Hardboard. Forest Products Journal, 5(2):61-64.
12. Okkonen, E. A.; River, B. H., 1988: Factors affecting the strength of block-shear specimens. Forest Products Journal, 39(1): 43-50.

13. Perkitny, T.; Jablonski, W., 1979: Untersuchungen über die Dehnbarkeit von Leimfugen. Holz als Roh- und Werkstoff, 37: 463-465.
14. Strickler, M. D., 1968: Specimen Designs For Accelerated Tests. Forest Products Journal, 14(1): 8A, 84-90.
15. Ćwietliezny, M., 1980: Über den Einflu der Neigung der Holzfasern auf die Festigkeit der Klebfugen. Holztechnologie, 21(2):83-87.
16. Tkalec, S.; Prekrat, S., 2000: Konstrukcije proizvoda od drva 1(osnove drvnih konstrukcija). Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
17. Yavorsky, J. M.; Cunningham, J. H.; Hundley, N. G., 1955: Survey of Factors Affecting Strength Tests of Glue Joints. Forest Products Journal, 5(10):306-311.
18. **** 1979: HRN H.K8.024 – Metode za ispitivanje ljepila za drvo; Određivanje smicajne čvrstoće.
19. **** 1983: DIN EN 205 – Bestimmung der Klebfestigkeit von Längsklebung im Zugversuch sowie bei statischer Dauerbelastung.
20. **** 1991: DIN EN 204 – Beurteilung von Klebstoffen für nichttragende Bauteile zur Verbindung von Holz und Holzwerkstoffen.
21. **** 1999: ASTM D 905-98 - Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading. American Society for Testing and Materials.
22. **** 2001: ISO 6238 – Adhesives – Wood-to-wood adhesive bonds – Determination of shear strength by compressive loading.

Corresponding address:

MSc. GORAN MIHULJA

Department for furniture and wood products
Faculty of Forestry, Zagreb University
Svetošimunska 25
HR-10000 Zagreb
Croatia
e-mail:mihulja@sumfak.hr