

Andrija Bogner, Ivica Grbac, Goran Mihulja<sup>1</sup>

# Zaostala naprezanja u lijepljenim drvnim konstrukcijama

## Residual stresses in the glued structural members of wood

**Izvorni znanstveni rad • Original scientific paper**

*Prispjelo - received: 14. 12. 1999. • Prihvaćeno - accepted: 18. 02. 2000.*

*UDK: 630\*824.81*

**SAŽETAK •** *U lijepljenim drvnim konstrukcijama redovito se pojavljuju zaostala naprezanja koja mogu biti prouzročena različitim uzrocima, kao što su kontrakcija volumena ljepila tijekom procesa otvrdnjavanja, bubrenje drva u procesu lijepljenja, nepravilni geometrijski oblici lijepljenih elemenata, tlak tijekom procesa lijepljenja itd.*

*Zaostala naprezanja smanjuju čvrstoću spoja, pa bi ih bilo korisno mjeriti, te na taj način ustanoviti glavne uzroke njihova nastanka. U radu su istražena naprezanja nastala zbog kontrakcije volumena ljepila tijekom procesa otvrdnjavanja. Prikazana je metoda mjerenja zaostalih naprezanja u lijepljenim drvnim konstrukcijama kao i rezultati za PVAC ljepilo i dva načina obrade sljubnica.*

**SUMMARY •** *In the glued structural wood members the residual stresses that regularly appear could be caused by different reasons such as: the contraction of the glue volume during the hardening process, swelling of the wood during the gluing process, irregular geometric shapes of the glued members, pressures during the gluing process, etc.*

*The residual stresses reduce the joint strength and it would be advisable to measure these stresses and thus find out the main reasons for their initiation.*

*This paper investigates residual stresses caused by the contraction of the glue volume during the hardening process. The paper is a survey of a method of measuring the residual stresses in the glued structural members of wood, and it also gives the results for PVAC glue and two techniques for woodworking the contact surfaces.*

---

<sup>1</sup> Autori su izv. profesor, redoviti profesor i asistent Šumarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.  
Authors are an associate professor, professor and assistant, respectively, at the Faculty of Forestry of the Zagreb University.

## I. UVOD I CILJ

### 1. Introduction and Aim

U istraživanjima procesa lijepljenja masivnog drva došlo se do spoznaje da je jedan od važnijih činitelja, koji utječe na čvrstoću i trajnost slijepljenog spoja zaostalo naprezanje u sloju ljepila.

To naprezanje nastaje tijekom procesa lijepljenja ili kasnije, tijekom otvrdnjavanja, a s vremenom se može povećavati ili smanjivati ovisno o reološkom ponašanju spoja (Ivanov, 1968; Prosser, 1977).

Zaostala naprezanja direktno utječu na čvrstoću spoja jer se superponderiraju s eksploatacijskim naprezanjima i tako u slučaju istog predznaka dovode do znatno većih naprezanja u spoju od proračunskih. Naprezanja u sloju ljepila umanjuju adheziju (Pizzi, 1994).

Kao što je već rečeno, zaostalo naprezanje u spoju nastaje tijekom procesa lijepljenja ili kasnije, i rezultat je mnogih faktora, od kojih ćemo spomenuti neke važnije:

- 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.

Pod geometrijski pravilnom sljubnicom podrazumijevamo sljubnicu čije se površine približavaju idealnoj ravnini i međusobno su paralelne.

Kod obrade na ravnalici, glodalici ili općenito kod cilindričnog ili radijalnog glodanja značajnu ulogu ima i ujednačenost putanje pojedinih noževa ili oštrica alata. Njihova neparalelnost u kružnim putanjama uzrokuje nepravilne sljubnice koje se dodiruju samo u nekim točkama, a odstupanja od pravilnih putanja rezultiraju različitim nepravilnostima geometrije sljubnice.

Nepravilni geometrijski oblici sljubnica nastaju i zbog predugog stajanja obrađenih neslijepljenih elemenata. Naime, obradom se skidaju slojevi drva i zbog gradijenta u sadržaju vode u drvu dolazimo do vlažnijih zona. U toku stajanja drvo se suši težeći ponovo doseći ravnotežno stanje vlage, a uslijed toga dolazi do deformacija oblika elemenata. Isto se događa i kod bubrenja uslijed navlaživanja.

Zaostala naprezanja u drvu izazvana nepravilnim sušenjem, također dovode do nepravilne geometrije sljubnica. Naprezanje zbog kontrakcije volumena ljepila nastaje u

toku procesa otvrdnjavanja ljepila, jer plohe sljubnica ne mogu pratiti tu kontrakciju. Kontrakcija volumena ljepila i zaostala naprezanja mogu prouzročiti nastanak mikropukotina u sloju ljepila. Naprezanja su veća u debelim slojevima adheziva, kao i u slojevima nejednolične debljina (Zubov, 1963), a jednoličan sloj ljepila postizemo kod sljubnica koje imaju pravilnu geometriju.

Svaka promjena sadržaja vode u drvu dovodi do promjene dimenzija i nastajanja unutarnjih naprezanja u spoju. Do promjene sadržaja vode u drvu može doći tijekom procesa lijepljenja ili u toku daljnje obrade i upotrebe slijepljenih spojeva. U procesu lijepljenja, nanošenjem ljepila koja sadrže vodu izazivamo bubrenje sloja drva do sljubnice, jer voda iz ljepila difundira u drvo. Kasnije dolazi do otvrdnjavanja ljepila koje radi toga sve teže prati promjenu dimenzija drva uslijed bubrenja pa se zbog toga razvijaju naprezanja. Sušenjem tog dijela drva dolazi do smanjenja naprezanja.

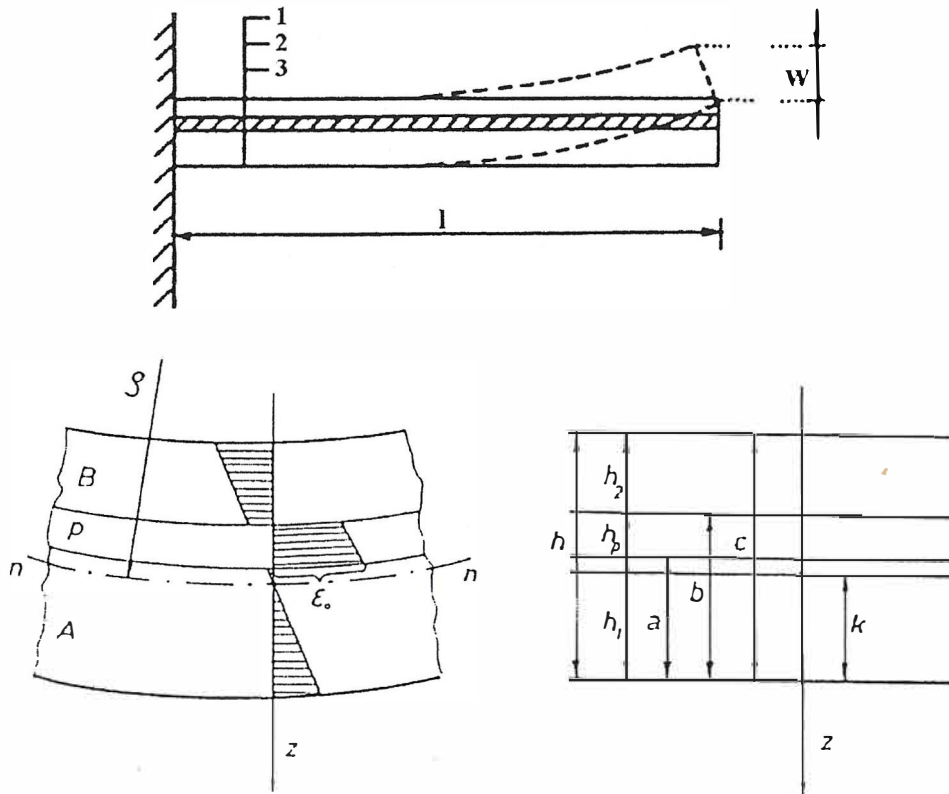
Razne promjene sadržaja vode u toku daljnjeg tehnološkog procesa i kasnije u upotrebi slijepljenih proizvoda dovode do cikličkih promjena intenziteta stvarnih naprezanja koja s vremenom sve više slabe čvrstoću spoja i na kraju mogu dovesti čak i do destrukcije. Ove pojave naročito dolaze do izražaja kod drvnih građevinskih konstrukcija koje su izložene diferencijalnoj klimi.

## 2. METODE ISTRAŽIVANJA

### 2. Research methods

Metode mjerenja naprezanja u konstrukcijama kao što su elektrootpornička tenzometrija, fotoelasticimetrija i druge teško se mogu primijeniti za mjerenja zaostalih naprezanja u sljubnicama zbog nemogućnosti pristupa sljubnici. Mnogi autori koriste konzolnu metodu (Croll, 1980).

Radi toga želimo prezentirati metodu mjerenja zaostalih naprezanja u sljubnicama pomoću konzole, koja je konstruirana kao asimetričan paket, kao što je prikazano na slici 1. Ovakav oblik konzole izabran je iz razloga što boljeg oponašanja uvjeta u sljubnici. Zbog kontrakcije volumena ljepila u toku procesa otvrdnjavanja i drugih ranije spomenutih uzroka doći će do savijanja konzole pa ćemo na njezinom slobodnom kraju moći izmjeriti progib  $w$ . Uz pomoć modula elastičnosti  $E$ , Poissonovih koeficijenata  $\nu$  za drvo i ljepilo, izmjerenog progiba  $w$  i dimenzija konzole može se izračunati naprezanje u sloju ljepila.



**Slika 1.**  
Principijelna shema konzolne metode s asimetrično konstruiranim paketom: 1-tanji sloj drva, 2-sloj ljepila, 3-deblji sloj drva, w-otklon konzole • Principle scheme of asymmetrically constructed console, 1 - thinner veneer, 2 - layer of glue, 3 - thicker veneer, w- console deflection.

**Slika 2.**  
Dijagram naprezanja u asimetrično konstruiranoj konzoli • Stress diagram in asymmetrically constructed console

Dijagram deformacija u smjeru uzdužne osi konzole nakon kontrakcije ljepila i eventualnog bubrenja drva, na osnovi kojeg se mogu izvesti izrazi za naprezanja u svakom pojedinom sloju prikazan je na slici 2.

Odnos radijusa neutralne linije i progiba kraja konzole može se prikazati jednadžbom (1)

Relation between radius of neutral line and deflection of console (1)

$$\frac{1}{\rho} = \frac{2w}{l^2} \quad (1)$$

Pritom je:

- l - dužina konzole • length of console
- $\rho$  - radijus zakrivljenosti konzole • radius of curvature of console
- w - otklon konzole • deflection of console

Smatrajući konzolu dijelom tanke višeslojne ploče, uz pretpostavku da su deformacije u poprečnom smjeru pri savijanju  $\epsilon_y = 0$  možemo dobiti izraze za deformacije i naprezanja u svakom sloju.

Deformacije:  
Deformations:

- dio "A", Part "A"

$$\epsilon_x = \frac{z}{\rho} = \frac{2w}{l^2} z \quad (2)$$

- dio "P", Part "P"

$$\epsilon_x = \frac{z}{\rho} + \epsilon_0 = \frac{2w}{l^2} z + \epsilon_0 \quad (3)$$

-dio "B", Part "B"

$$\epsilon_x = \frac{z}{\rho} = \frac{2w}{l^2} z \quad (4)$$

Naprezanja:  
Stresses:

- dio "A", Part "A"

$$\sigma_x^A = \frac{E_d}{1-\nu_d^2} \epsilon_x = \frac{E_d}{1-\nu_d^2} \frac{2w}{l^2} z \quad (5)$$

- dio "P", Part "P"

$$\sigma_x^P = \frac{E_P}{1-\nu_P^2} \epsilon_x = \frac{E_P}{1-\nu_P^2} \left( \frac{2w}{l^2} z + \epsilon_0 \right) \quad (6)$$

- dio "B" Part "B"

$$\sigma_x^B = \frac{E_d}{1-\nu_d^2} \epsilon_x = \frac{E_d}{1-\nu_d^2} \left( \frac{2w}{l^2} z \right) \quad (7)$$

Jednadžbe ravnoteže za konzolu  $\Sigma F_x = 0$  i  $\Sigma M_y = 0$  moraju biti zadovoljene u svakom trenutku i mogu se napisati u obliku (8) i (9).

$$\Sigma F_x = 0 \quad \int_{k-a}^k \sigma_x^A dA + \int_{k-b}^{k-a} \sigma_x^P dA + \int_{k-c}^{k-b} \sigma_x^B dA = 0 \quad (8)$$

$$\Sigma M_y = 0 \quad \int_{k-a}^k \sigma_x^A z dA + \int_{k-b}^{k-a} \sigma_x^P z dA + \int_{k-c}^{k-b} \sigma_x^B z dA = 0 \quad (9)$$

Uvrštenjem izraza (5), (6) i (7) u jednadžbu (8) i (9) dobivamo izraze (10) i (11).

$$\int_{k-a}^k \frac{E_d}{1-\nu_d^2} \frac{2w}{l^2} z dz + \int_{k-b}^{k-a} \frac{E_p}{1-\nu_p^2} \left( \frac{2w}{l^2} z + \epsilon_0 \right) dz + \int_{k-c}^{k-b} \frac{E_d}{1-\nu_d^2} \frac{2w}{l^2} z dz = 0 \quad (10)$$

$$\int_{k-a}^k \frac{E_d}{1-\nu_d^2} \frac{2w}{l^2} z^2 dz + \int_{k-b}^{k-a} \frac{E_p}{1-\nu_p^2} \left( \frac{2w}{l^2} z^2 + \epsilon_0 z \right) dz + \int_{k-c}^{k-b} \frac{E_d}{1-\nu_d^2} \frac{2w}{l^2} z^2 dz = 0 \quad (11)$$

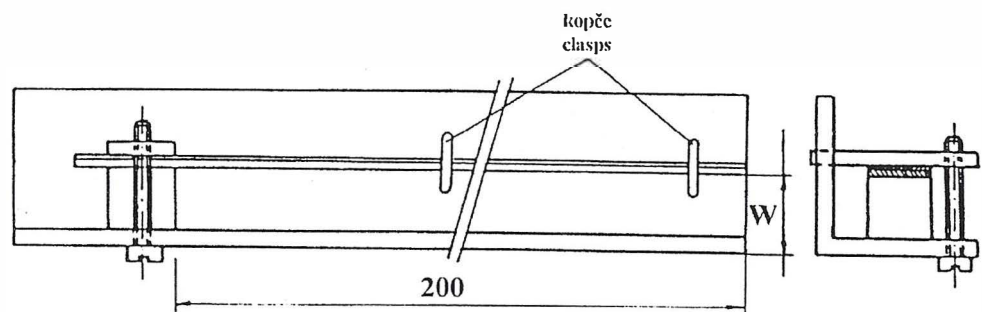
Integriranjem i rješavanjem navedenih jednakosti možemo izračunati položaj neutralne linije  $k$  i početnu deformaciju u sloju ljepila  $\epsilon_0$ . Na osnovi tih veličina, iz izraza (6) moguće je izračunati naprezanja u sloju ljepila P.

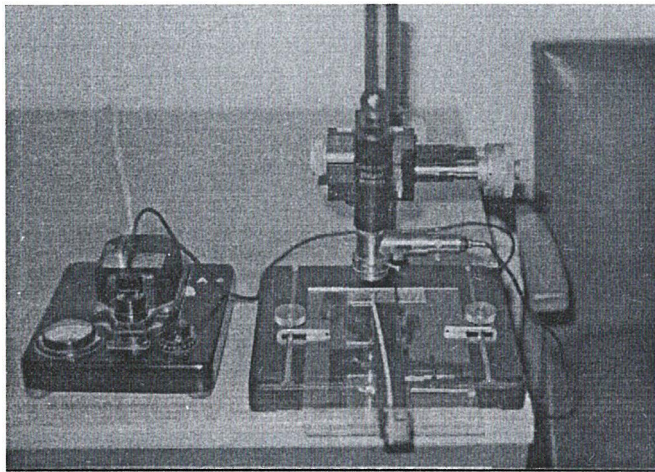
### 3. UZORCI 3. Samples

Uzorci za konzole izrađeni su od buk-ovih furnira koji su obrađeni tako da su im sljubnice obrađene na ravnalici ili kružnoj pili blanjalicu DIHL, a zatim su na preciznoj kružnoj pili ispiljeni furniri debljine 0,5 mm (tanji furnir u konzoli) i 1,0 mm (deblji furnir u konzoli). Na taj način na sljubnici ostaju mikroneravnine od obrade. Veličina mikroneravnina (hrapavost) mjerena je profilografom TALYSURF 10 s Low magnification pick-up radijusom kontaktne igle od 12,5  $\mu\text{m}$ . Sva su mjerenja izvršena u smjeru vlaknaca drva, a hrapavost je izražena srednjim aritmetičkim odstupanjem profila

Ra. Prije lijepljenja furniri su kondicionirani u klima komori na ravnotežni sadržaj vode od 7% i tek tada sljepljivani PVAC ljepilom. Ljepilo se nanosilo nazubljenom lopaticom, kako bi na svim uzorcima nanos ljepila bio jednak. Nakon nanošenja ljepila, na ljepilo je postavljen gornji (tanji) furnir. Uzorci su postavljeni između dvije ravne metalne ploče i opterećeni utezima, tako da je specifični tlak iznosio 0,3  $\text{N/mm}^2$  u trajanju od 10 minuta. Nakon toga učvršćeni su u specijalne nosače kao što je to prikazano na slici 3. te se provodilo mjerenje početnog položaja konzole na mikroskopu s koordinatnim postoljem. Mjerni uređaj za otklon konzole prikazan je na slici 4. Daljnja mjerenja progiba obavljala su se nakon 10, 25 i nadalje svakih 50 min. sve do 350-te min. što predstavlja dovoljno vrijeme za otvrdnjavanje ljepila. Između mjerenja uzorci su stajali u klima komori u kojoj su uvjeti odgovarali vlazi ravnoteže od 7% kao što je prikazano na slici 5.

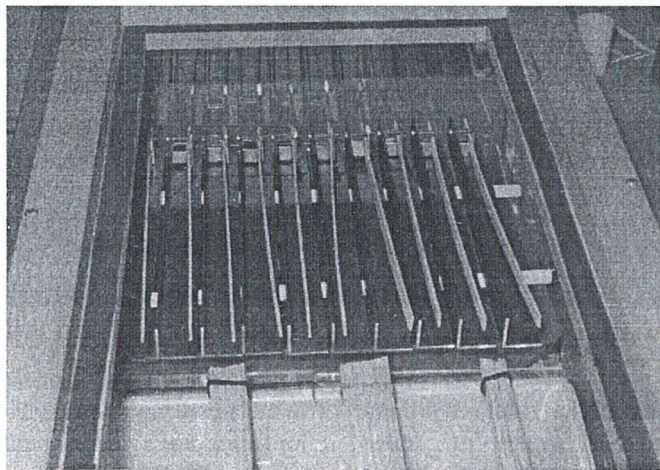
**Slika 3.**  
Način učvršćenja konzole u nosač •  
Fixing the console into the holder





**Slika 4.**

Mjerni mikroskop za mjerenje otklona konzole • Microscope for measuring the deflections of consoles



**Slika 5.**

Uzorci u klima komori • Samples in climate chamber

#### 4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

##### 4. Research results and discussion

Opisanim metodama za mjerenje zaostalih naprezanja u sljubnici provedena su istraživanja na uzorcima koji su imali sljubnice (lijepljene površine) obrađene ravnalicom ili kružnom pilom blanjalicom DIHL, a spoj je bio slijepjen PVAC ljepilom. U proračunu su korišćene veličine: modul elastičnosti za bukovinu  $E_d = 16\ 000\ \text{N/mm}^2$  i

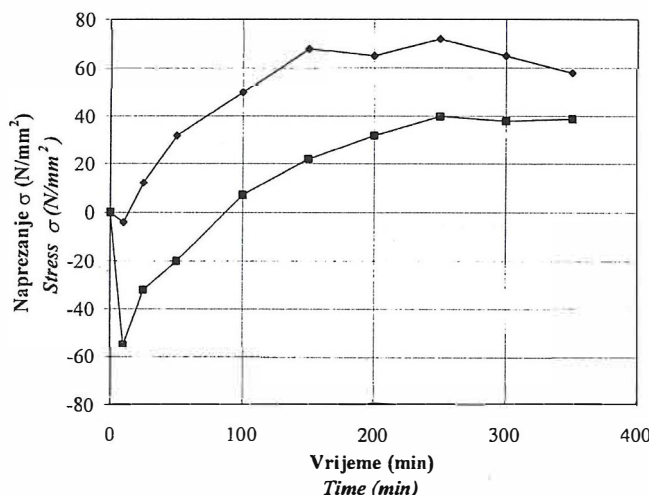
Poissonov koeficijent  $\nu = 0,45$  (Kollman, 1975).

modul elastičnosti za ljepilo  $E_p = 2\ 500\ \text{N/mm}^2$  i

Poissonov koeficijent  $\nu = 0,40$  (Freidin, 1980).

Srednja dužina konzole bila je  $l = 20\ \text{mm}$ , debljina donjeg furnira  $= 1\ \text{mm}$ , debljina donjeg furnira i ljepila  $b = 1,3\ \text{mm}$  i ukupna debljina konzole  $c = 1,9\ \text{mm}$ .

Promjena naprezanja u sloju ljepila tijekom vremena prikazana je u dijagramu na slici 6.

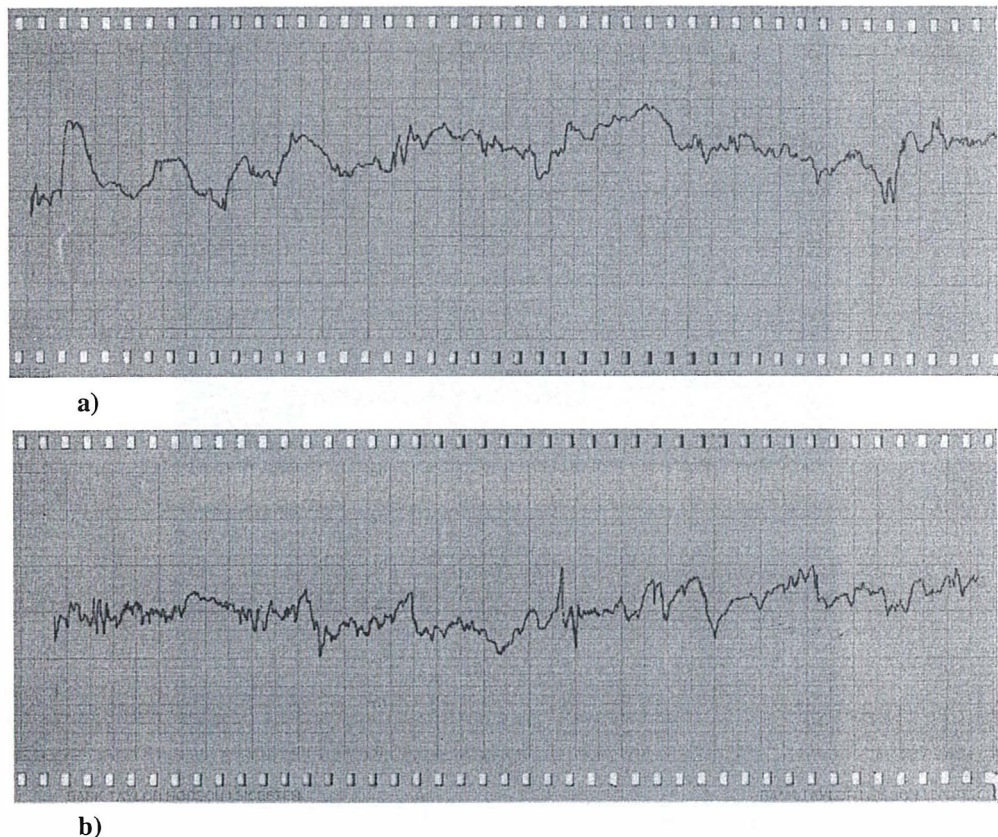


**Slika 6.**

Zaostala naprezanja u sloju PVAC ljepila za sljubnice (lijepljene površine) obrađene ravnalicom ■ ili kružnom pilom blanjalicom DIHL ◆. • Residual stresses in PVAC glue layer for contact surfaces working with planing machine ■ or circular sawing machine for planing surfaces DIHL ◆.

**Slika 7.**

Mjerni dijagrami hrapavosti lijepljenih površina a) blanjana površina, b) površina obrađena kružnom pilom blanjalicom DIHL  
 • Measuring diagrams for contact surfaces a) surface machined with planing machine b) surface machined with circular saw for planing surfaces DIHL.



Iz dijagrama na slici 6 vidljivo je da su sljubnice obrađene ravnalicom imale neusporedivo veća naprezanja u sloju ljepila od sljubnica koje su bile obrađivane kružnom pilom blanjalicom DIHL. Razlog toj pojavi može se potražiti u većoj hrapavosti površine obrađivane ravnalicom. Mjerenjem hrapavosti utvrdili smo da su sljubnice obrađivane na ravnalici imale srednje aritmetičko odstupanje profila  $R_a = 6,7 \mu\text{m}$ , a sljubnice obrađivane na kružnoj pili blanjalici  $R_a = 4,2 \mu\text{m}$ . Mjerenje je izvršeno na dužini sljubnice od 20 mm u smjeru vlaknaca drva, a mjerni dijagrami prikazani su na slici 7.

Radi veće hrapavosti blanjanih sljubnica u sljubnici je stvoren sloj ljepila nejednolike debljine, ali i prosječno deblji sloj ljepila nego kod sljubnica obrađivanih na kružnoj pili blanjalici koje su imale manju hrapavost, jer je ljepilo prilikom nanošenja ulazilo u površinske šupljine, kao što su cikloide i mjesta isčupanih vlaknaca. Stoga konzole s blanjanom sljubnicom u početnoj fazi naprezanja pokazuju veći negativni otklon uslijed bubrenja drva prouzročenog vodom iz ljepila koje zbog većeg nanosa ljepila ima više, a i radi veće dubine hrapavosti penetrira brže i dublje u drvo. Ukupno naprezanje konzola s blanjanom površinom veće je od konzola koje su imale površinu sljubnica obrađenu kružnom pilom blanjalicom. To se također može objasniti debljim slojem ljepila i većom neujednačenošću debljine

ljepila kod konzola s blanjanom sljubnicom. Naime pored već navedenih razloga deblji sloj ljepila ima i veću kontrakciju volumena prilikom otvrnjavanja, a to rezultira i većim naprezanjima u sloju ljepila.

## 5. ZAKLJUČAK 5. Conclusion

Iz dijagrama na slici 6. vidljivo je da različito obrađene sljubnice imaju znatno različite iznose i različit tijek promjene naprezanja u lijepljenom spoju tijekom vremena. Naprezanja izmjerena pri obradi na ravnalici iznose oko  $90 \text{ N/mm}^2$ , međutim moguće je da su stvarna naprezanja nešto manja zbog početne velike plastičnosti ljepila, koju je nemoguće uključiti u proračun i najsloženijim reološkim ispitivanjima.

Ovako velika naprezanja u sloju ljepila mogu uzrokovati nastanak mikropukotina u sloju ljepila koje mogu postati centri destrukcije spoja pa na taj način direktno umanjuju čvrstoću i trajnost spojeva.

Da bi se naprezanja u sloju ljepila umanjila, potrebno je posvetiti veću pažnju obradi sljubnica, viskozitetu ljepila, njegovom nanošenju i specifičnom tlaku pri stezanju, kako bi formirani sloj ljepila bio što tanji i što ujednačenije debljine, a ljepilo bi trebala imati minimalnu kontrakcije volumena. Na taj ćemo način smanjiti unutrašnja naprezanja u sloju ljepila, a lijepljeni spojevi bit će čvršći i trajniji.

## 6. LITERATURA

### 6. References

1. Croll, S. G. 1980: An overhanging beam method for measuring internal stress in coatings SOCCA, 63, No. 7, 221-275.
2. Freidin, A. S., Vuba, K.T. 1980: Prognozirovanie svoystv kleevih soedineni drevesini. Lesnaja Prom., Moskva
3. Ivanov, JU.M., Ljeparski, L.O. 1968: Modelirovanie i reologija vnutrenih naprjazhenij v drevesine i kleevyh soedineniah. Derevoobrab. Prom.
4. Kollman, F Kuenzi, E.V., Stamm, A.J. 1975: Principles of Wood science and Technology. Springer Verlag
5. Pizzi, A., Mittal, K.L. 1994: Handbook of adhesive technology. Marcel Dekker, Inc. NY.
6. Prosser, J. L. 1977: Internal Stress Studies. Modern Paint and Coatings, July, 47-51.
7. Zubov, P. I., Suhareva, L. A. i dr. 1963: Issledovanie mehanizma formirovanija poliefirnyh pokrytij na derevjanyh podložkah. Lakokras. mater.; 6, 28-31.

## *Najava međunarodnog znanstvenog savjetovanja*

# ”Drvo u graditeljstvu”

## (Wood in the construction industry)

Obavještavamo sve zainteresirane da će se u Zagrebu, u okviru Međunarodnog sajma graditeljstva na Zagrebačkom Velesajmu, u srijedu 26. travnja 2000. održati jednodnevno međunarodno znanstveno savjetovanje pod naslovom “Drvo u graditeljstvu” (Wood in the construction industry).

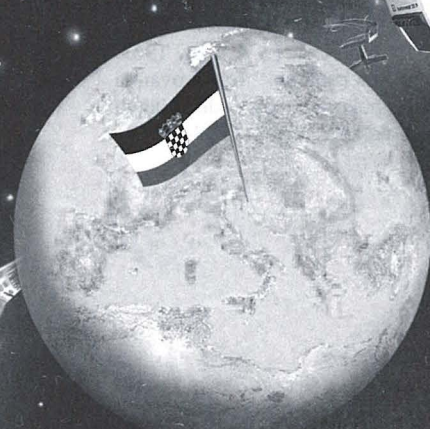
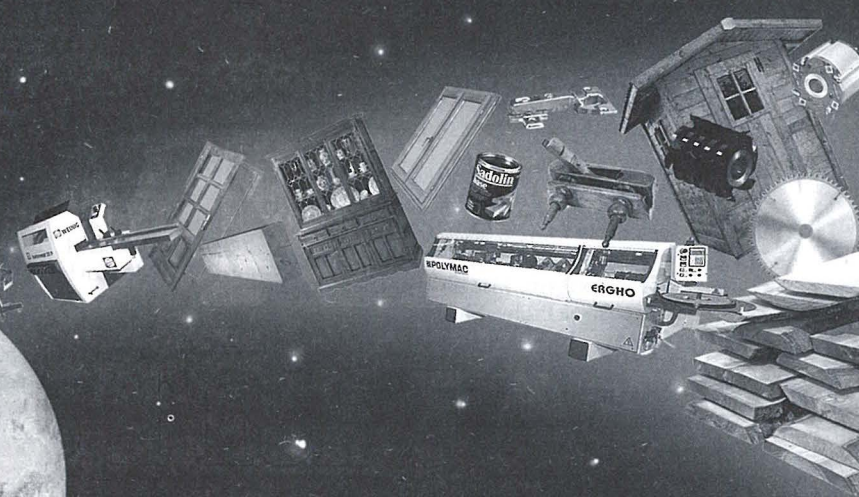
Savjetovanje organizira Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za istraživanja u drvnj industriji u suradnji sa Zagrebačkim Velesajmom.

Predviđa se jednodnevni rad savjetovanja na kojem će biti predstavljeni radovi znanstvenika iz Velike Britanije, Slovačke, Slovenije i Hrvatske. Savjetovanje je otvoreno za sve zainteresirane slušače. Službeni jezik odvijanja savjetovanja je za inozemne autore engleski, a znanstvenici iz Hrvatske, svoje će radove predstaviti na hrvatskom jeziku. Tijekom izlaganja omogućit će se dvojezična komunikacija između predavača i prisutnih slušatelja.

Prezentirani radovi bit će tiskani u zasebnom zborniku radova. Pozivamo sve zainteresirane proizvođače drvnih građevnih proizvoda, zaštitinih sredstava i dekorativnih premaza za drvo, kao i građevinske tvrtke, da posebnom prijavom osiguraju mogućnost oglašavanja u zborniku, te izravno predstave svoje proizvode.

Daljnje obavijesti u vezi oglašavanja se mogu dobiti na Šumarskom fakultetu, Zavodu za istraživanja u drvnj industriji (tel. 01 – 2352 465, 2352 478, fax. 01- 2352 528) kod Izv. prof. dr. Andrije Bognera ili gđe Dubravke Cvetan.

časopis  
**drvo**...



... najjači hrvatski medij za  
promociju drvne industrije i obrta

Obavijest čitateljima:

Zbog tiskanja ograničenog broja primjeraka nismo u mogućnosti naknadno isporučivati starije brojeve.

Zato osigurajte vlastiti primjerak i ne propustite obnoviti pretplatu. Ispunite priloženi kupon za pretplatu ODMAH.

Pretplata u Hrvatskoj samo 122 kn.

Časopis Drvo vaš je najvažniji promotivni medij. Koristite pogodnosti pripreme vašeg reklamnog materijala i zakupa stalnog prostora u DRVU.

Izdavač:

TILIA'CO

Rujanska 3, 10000 Zagreb, Croatia,

tel.: +385 /01/387-3934,

tel./fax: +385 /01/387-3402,

e-mail: [tiliaco@zg.tel.hr](mailto:tiliaco@zg.tel.hr),

<http://www.netstudio.hr/tiliaco/>

