

# Prilog istraživanju utjecaja nekih tehnoloških faktora na kvalitetu lijepljenja drva<sup>(1)</sup>

Mr Stjepan Petrović, dipl. ing.

UDK 634.0.824.8:634.0.832.286

Institut za drvo Zagreb

Vladimir Ferdelji, dipl. ing.

Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb

Primljeno: 25. 3. 1980.

Prihvaćeno: 3. 6. 1980.

Izvorni znanstveni rad

## Sažetak

Primjena lameliranih drvnih konstrukcija u građevinarstvu u jugoslavenskim okvirima postaje svakim danom sve interesantnija. S tim u vezi nametnula se potreba da se, uz primjenu suvremenih metoda znanstvenog planiranja pokusa, istraži utjecaj nekih tehnoloških faktora na kvalitetu lijepljenog spoja. Kod izbora utjecajnih faktora vodilo se računa o stvarnim uvjetima u neposrednoj proizvodnji. Kao utjecajni faktori izabrani su sadržaj vlage na tri nivoa, te mikroklima u pogonu, vrsta ljepila i specifični nanos ljepila na dva nivoa. Uz primjenu faktorskog plana pokusa  $3 \times 2^3$  istražena je veličina utjecaja pojedinih faktora i njihovih međusobnih interakcija na kvalitetu lijepljenja lamela iz jele/smrčke. Za ispitivanje su korištene lamele iz neposredne proizvodnje, pripremljene na uobičajeni način. Po tri lamele dimenzija  $1000 \times 200 \times 34$  mm slijepljene su u uzorak. Kao mjerila kvalitete lijepljenja uzeti su: čvrstoća na smicanje, učešće smicanja po drvu i dubina penetracije ljepila u drvo. Dobiveni rezultati obrađeni su odgovarajućim matematičko-statističkim metodama. Na nivou vjerojatnosti 0,01 signifikantan utjecaj pokazali su: vlaga drva, vrsta ljepila i specifični nanos ljepila, te neke njihove interakcije. Ovim planom pokusa protumačeno je ukupno 72,67% utjecaja svih faktora.

**Ključne riječi:** lamelirane drvene konstrukcije — faktorski plan pokusa — nivo djelovanja faktora — čvrstoća na smicanje — dubina penetracije ljepila u drvo — signifikantnost utjecaja faktora.

## CONTRIBUTION TO EXAMINATION OF INFLUENCES OF SOME TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE QUALITY OF WOOD GLUING

### Summary

Application of laminated wood structures in building trade in Yugoslavia is becoming every day more and more interesting. Therefore, beside the application of present-day methods of scientific planning of experiments, it is also necessary to examine the influence of some technological factors on the quality of the glued joints.

In choosing the influential factors the attention had been paid to existing conditions in direct production.

The influential factors were: moisture content on three levels, microclimate in the plant, type of glue and specific coat of glue on two levels.

With the application of factorial plan of experiment  $3 \cdot 2^3$  the extent of influences of individual factors and their interactions on the quality of gluing lamellas of fire/spruce have been examined. Lamellas were taken from direct production and were prepared in usual manner. Three lamellas in the size  $1000 \times 200 \times 34$  mm were glued together in a sample.

The shearing strength, the shearing on the wood and the penetration of glue into the wood were used as criterions for estimation of the quality of gluing.

The results obtained were solved by mathematical and statistical methods. On the level of probability 0,01, the significant influence showed: moisture of wood, type of glue and specific coat of glue and some of their interactions. By this plan of experiment a total of 72,67% influences of all factors have been explained.

**Key words:** laminated wood structures — factorial plan of experiment — level of the factor influence — shearing strength — penetration of glue into the wood — significance of the factor influence

(1) Zahvaljujemo DI »GAJ« — OOUR Voćin, Kemijskom kombinatu »CHROMOS« Zagreb, te suradnicima mr Salah E. Omeru, dipl. ing., Stjepčević Iliji, dipl. ing. i Lukačić Ivi na pomoći u provođenju eksperimenta.

## 1.0 UVOD

O lijepljenju drva kao prirodnog polimernog materijala mogao bi se navesti priličan broj izvora iz literature. Premda o prvim počecima razvoja tehnike lijepljenja znamo još iz starih povijesnih zapisa [12], tek se u 19. stoljeću ova problematika počinje ozbiljnije znanstveno istraživati. Posljedica toga je bio nevjerojatno brzi razvoj proizvodnje ljepila na sintetskoj osnovi. Bez pretjerivanja može se konstatirati da se razvoj kompleksne prerade drva danas ne bi mogao zamisliti bez sintetskih materijala općenito, a posebno ljepila. Da bi se to potkrijepilo, dovoljno je imati na umu proizvodnju pločastih materijala i namještaja, a u posljednje vrijeme i lameliranih drvnih inženjerskih konstrukcija. Za razliku od prije navedenih proizvoda, kod lameliranih nosača, koji se pretežno koriste u gradnji industrijskih, sportskih i drugih objekata sličnih namjena, sigurnosti konstrukcije posvećuje se znatno veća pažnja [6].

Na sigurnost ovakvih konstrukcija utječe nekoliko osnovnih faktora, kao npr. kvaliteta drva, kvaliteta ljepila, tehnološki uvjeti rada itd. [1, 5, 6]. Stoga ova problematika ostaje i dalje područje istraživanja u cilju boljeg upoznavanja međusobnog utjecaja pojedinih tehnoloških faktora. Zadatak ovog rada je da osvijetli utjecaj tehnoloških faktora i njihovih interakcija na kvalitetu lijepljenja lameliranih drvenih nosača posebno, a time i na lijepljenje masivnog drva jele/smreke općenito. Na kvalitetu lijepljenja drva utječe niz tehnoloških faktora [2, 4, 10, 11]. Veličina njihovog utjecaja ovisna je o obliku drvnog materijala koji se lijepi, vrsti veznog sredstva i samoj tehnologiji lijepljenja. Za šire upoznavanje navedene problematike i do danas postavljene teorije lijepljenja postoji odgovarajuća literatura [1, 2, 3, 13, 14, 15].

## 2.0 METODOLOGIJA ISPITIVANJA

### 2.1 Izbor materijala za ispitivanje

Za predmetna ispitivanja upotrijebljene su lamele jele/smreke iz normalne industrijske proizvodnje. Lamele dimenzija 1000 mm x 200 mm x x 38 mm izrađene su iz piljenica dimenzije 4000 mm x 200 mm x 38 mm. Izbor piljenica iz raspoložive količine izvršen je na principu slučajnog izbora, a u skladu s postavljenim planom pokusa. Lamele su potom upakirane u najlonske vreće, da bi se spriječio gubitak vlage, a potom dopremljene u Institut za drvo. Postupak s lamelama opisan je u točki 2.5. Kao vezna sredstva upotrijebljena su rezorcin-fenolformaldehidna ljepila (RFK i RFR). Navedene vrste ljepila danas se najčešće koriste u proizvodnji lameliranih drvnih inženjerskih konstrukcija.

Upotrijebljena vezna sredstva imala su slijedeće fizikalno-kemijske karakteristike:

	Ljepilo RFK	Ljepilo RFR
Sadržaj suhe supstance	63,02	55,30
pH vrijednost	7,98	8,98

### 2.2 Izbor utjecajnih faktora

Za predmetna ispitivanja izabrani su slijedeći utjecajni faktori:

- sadržaj vlage u drvu
- uvjeti lijepljenja (mikroklima)
- vrsta ljepila
- specifični nanos ljepila

Izbor ovih faktora izvršen je na osnovu analize objavljenih radova [1, 4, 5, 10, 11], praktičnih iskustava stečenih u proizvodnji lameliranih nosača, te zbog potrebe da se proizvođačima konstrukcija ukaže na veličinu utjecaja pojedinih faktora u cilju osiguranja kontinuirane kvalitete lijepljenja.

Polazeći od pretpostavke da sadržaj vlage u drvu prije lijepljenja predstavlja značajan utjecajni faktor na kvalitet lijepljenja, izabrana su tri nivoa vlažnosti:

- I sadržaj vlage 14—15%
- II sadržaj vlage 9—10%
- III sadržaj vlage 6,5—7,5%

Svaki od izabranih nivoa predstavljen je zapravo uskim područjem sadržaja vlage, jer praktično nije bilo moguće postići veću preciznost u radu.

Kod izbora mikro-klimatskih uvjeta za lijepljenje namjera je bila da se proizvođačima lameliranih konstrukcija ukaže na opasnost od nekvalitetnog lijepljenog spoja zbog neodgovarajućih mikro-klimatskih uvjeta. U tu svrhu izabrane su dvije mikroklima, karakteristične za zimski i ljetni period rada. Da bi se približno odredili ekstremni mikro-klimatski uvjeti u pogonu, snimljeni su podaci za dnevnu temperaturu i relativnu vlagu u zimskom i ljetnom periodu iz pogonske dokumentacije jednog domaćeg proizvođača. Na osnovu snimljenih podataka izabrana su dva nivoa mikro-klimatskih uvjeta kako slijedi:

- zimski period (15°C, 53% rel. vlage)
- ljetni period (25°C, 65% rel. vlage)

Polazeći od hipoteze da vrsta ljepila, odnosno njegov sastav i stupanj kondenzacije, mogu imati utjecaj na kvalitet lijepljenog spoja, izabrana su dva tipa ljepila (RFK i RFR), čije su osnovne fizikalno-kemijske karakteristike navedene u točki 2.1. Namjera je bila spomenutu hipotezu, upravo uz primjenu odgovarajućeg plana pokusa, dokazati ili odbaciti.

Pri upotrebi obje vrste ljepila proizvođači preporučuju specifični nanos u granicama 150—300 gr/m<sup>2</sup>. U proizvodnji lameliranih nosača koristi se u pravilu veći nanos, da bi se pokrije manjkavosti u samom tehnološkom procesu, a s većim ili manjim nanosom unosi se i veća ili manja



količina vode, a mijenjaju se i neki drugi tehnološki parametri. Stoga je ocijenjeno kao interesantno utvrditi kvalitet lijepljenja kod rada s ova dva ljepljiva pri istom specifičnom nanosu, ne ulazeći pri tom detaljnije u specifične karakteristike ljepljiva RFK i RFR. Za ispitivanje izabrana su dva nivoa specifičnog nanosa, i to 200 gr/m<sup>2</sup> i 300 gr/m<sup>2</sup>. Pri tom se vodilo računa da donji nivo nanosa bude dovoljan da se ljepljivo jednoliko rasporedi po površini lijepljenja.

### 2.3 Plan pokusa

Za predmetno ispitivanje izabran je potpuni faktorski plan pokusa 3 · 2<sup>3</sup> kao najpovoljnija metoda za određivanje utjecaja pojedinih faktora na kvalitetu lijepljenja [2]. Faktori čiji se utjecaj želi utvrditi variraju se istovremeno na *r* (*s*, *t*) nivoa. Ako npr. imamo »n« faktora koji variraju na »r« nivoa i »m« faktora na »s« nivoa, ukupni broj uzoraka koji treba ispitati može se izračunati prema [1].

$$N = r^n \cdot s^m \quad (1)$$

Kao što je u točki 2.2 navedeno, u okviru ovog ispitivanja jedan faktor je variran na tri nivoa, a preostala tri faktora na dva nivoa, što prema formuli (1) daje ukupno

$$N = 3^1 \cdot 2^3 = 24 \text{ kombinacije}$$

Prema tome, za predmetno ispitivanje potrebno je bilo slijepiti najmanje 24 uzorka koji će se međusobno razlikovati u nivou barem jednog od faktora.

Izabrani utjecajni faktori i njihovi nivoi djelovanja s pripadajućim oznakama prikazani su u tablici I.

OZNAKE I NIVOI DJELOVANJA UTJECAJNIH FAKTORA

Tablica I

FAKTORI	Oznaka faktora	Nivo utjecajnog faktora	Oznaka nivoa faktora
Mikro klima	A	t = 15°C, RV = 53%	A <sub>1</sub>
		t = 25°C, RV = 65%	A <sub>2</sub>
Vlažnost drva	B	14—15%	B <sub>1</sub>
		9—10%	B <sub>2</sub>
		6,5—7,5%	B <sub>3</sub>
Vrste ljepljiva	C	RFK	C <sub>1</sub>
		RFR	C <sub>2</sub>
Nanos ljepljiva	D	300 gr/m <sup>2</sup>	D <sub>1</sub>
		200 gr/m <sup>2</sup>	D <sub>2</sub>

Pregled svih uzoraka, odnosno kombinacija za ispitivanje po planu pokusa, prikazan je u tablici II.

Tablica II

Faktor A	Faktor B	Faktor C	Faktor D	Uzorak (kombinacija)
A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>
			D <sub>2</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>
		C <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>
			D <sub>2</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>
	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>
			D <sub>2</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>
		C <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>
			D <sub>2</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>
	B <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>
			D <sub>2</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>
		C <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>
			D <sub>2</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>
A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>
			D <sub>2</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>
		C <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>
			D <sub>2</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>
	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>
			D <sub>2</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>
		C <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>
			D <sub>2</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>
	B <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>
			D <sub>2</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>
		C <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>
			D <sub>2</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>

Plan pokusa za predmetno ispitivanje sastavljen je na prikazani način, s namjerom da se omogućiti kompjuterska obrada rezultata, a time i dobivanje uvida u utjecaj svakog promatranog faktora i njihovih interakcija na kvalitetu slijepljenog spoja.

Broj ponovljenih očitavanja odlučujući je faktor o kojemu ovisi sigurnost eksperimenta. Metodom matematičke statistike taj se broj može procijeniti sa željenom vjerojatnošću, ali za te postupke eksperimentator mora znati koja se oblast rezultata treba ispitati, kolika je disperzija sveukupnosti rezultata i koliki su rizici pri eksperimentu [9]. Zbog nepoznavanja tih podataka, u ovom ispitivanju za izbor broja očitavanja primijenjena je metoda za koju je potrebno manje polaznih podataka. U toj metodi polazi se od pretpostavke da će rezultati ispitivanja pripadati normalnoj razdiobi sa standardnim odstupanjem

$$\bar{X}_i \pm k \cdot s_i \quad (3)$$

Za vrijednost  $V = 95\%$  da učešće svih rezultata  $\gamma = 0,9$  bude u granicama  $\bar{X} \pm 2,66 S$ , proizlazi da minimalan broj očitavanja treba iznositi  $n = 12$  [9]. Uzevši u obzir nehomogenost drva i mo-

guće greške kod izrade epruveta, od svakog uzorka (kombinacije) izrađeno je ukupno 16 epruveta, što za 24 kombinacije daje ukupno 384 epruvete.

Statistička obrada dobivenih rezultata obuhvatila je analizu varijance. Signifikantnost utjecaja pojedinih faktora i njihovih interakcija određena je pomoću F testa. Za detaljnije upoznavanje s navedenim metodama obrade čitalac se upućuje na literaturu [7, 8, 9].

#### 2.4 Izbor mjerila kvalitete

Za određivanje kvalitete lijepljenih spojeva izabrana su slijedeća mjerila:

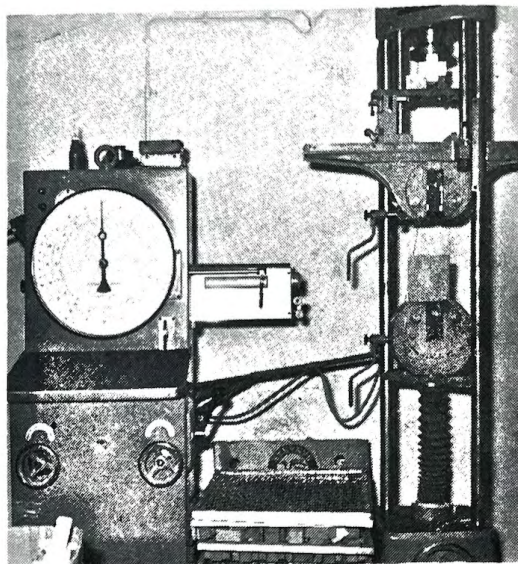
- čvrstoća na smicanje u sloju ljepljiva
- učešće smicanja po drvu odnosno ljepljivu
- dubina penetracije ljepljiva u drvo.

Naprezanje na smicanje je tangencijalno naprezanje u materijalu koje izaziva poprečna sila djelujući na kritični presjek. Najveći problem pri određivanju smičnog naprezanja je kako postići čvrsto smično naprezanje po željenom presjeku. Naime, smik se često pojavljuje zajedno s momentom savijanja, pa dobiveno naprezanje predstavlja zapravo kombinirano naprezanje.

Za dobivanje čistog smičnog naprezanja vrlo je važan oblik epruvete. Pri izboru oblika epruvete za ispitivanje smične čvrstoće imalo se u vidu da oblik treba omogućiti jednostavnu i točnu izradu i da prilikom ispitivanja nije potrebno dodatno stezanje. S obzirom na te uvjete izabran je oblik epruvete za ispitivanje prema metodi EMPA-Zürich (sl. 1). Ispitivanje je provedeno na poluautomatskom stroju WOLPERT tip U-5. (sl.2) pri brzini djelovanja sile od 20 mm/m.n. U momentu pucanja registrirana je sila loma P, a čvrstoća na smicanje računata je po formuli (2)

$$\sigma_s = \frac{P}{A} \quad (\text{kp/cm}^2) \quad (2)$$

gdje je A ukupna površina smicanja. Prije ispitivanja svake epruvete kontroliran je kvalitet njezine izrade i izmjerena dimenzija kritične povr-

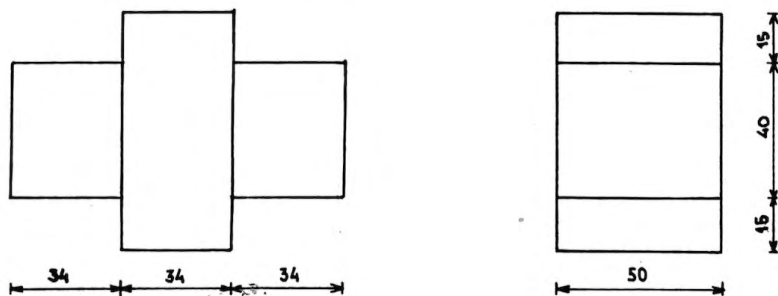


Slika 2. Stroj za ispitivanje drva Otto-Wolpert, tip U5.

šine smicanja. Ispitivanje čvrstoće na smicanje provedeno je na epruvetama u suhom stanju.

Nakon registriranja sile loma svaka epruveta je pregledana da bi se utvrdilo učešće loma po drvu, odnosno po ljepljivu. Spomenuto mjerilo omogućuje da se pravilnije ocijeni kvaliteta lijepljenja i u slučajevima kada je apsolutna sila loma, odnosno čvrstoća na smicanje, zbog prirodne nehomogenosti drva manja ili veća od očekivane. Ocjena površine smicanja uzima se u pravilu zajedno s čvrstoćom na smicanje kod ocjenjivanja kvalitete lijepljenja.

Dubina penetracije ljepljiva u drvo uzeta je također kao pomoćno mjerilo, da bi se omogućilo bolje tumačenje određenih rezultata u zavisnosti od veličine utjecaja pojedinog faktora, te njihovo povezivanje s teoretskim spoznajama o lijepljenju drva. U tu svrhu iz karakterističnih uzoraka su izrađene epruvete dimenzija 25 mm x 10 mm iz zone lijepljenog spoja. Epruvete su zatim kuhane u vodi 2 sata da bi omekšale. Iz epruveta su potom mikrotomskim nožem izrezani preparati dimenzija 10 mm x 0,3 mm, pogodni za mi-



$$M = 1:2$$

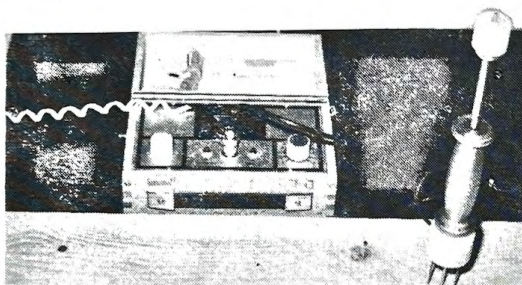
Slika 1. Epruveta za ispitivanje čvrstoće na smicanje prema EMPA — Zürich



kroskopsko promatranje u prolaznom svjetlu. Izrežani preparati potopljeni su u glicerin da bi se izravnali, a zatim položeni na mikroskopsko stakalce i pokriveni pokrovnim stakalcem. Dobiveni preparat promatran je na mikroskopu pod povećanjem od 40 puta. Na mikroskop je zatim pričvršćen fotografski aparat kojim su preparati snimljeni.

### 2.5 Provedba eksperimenta

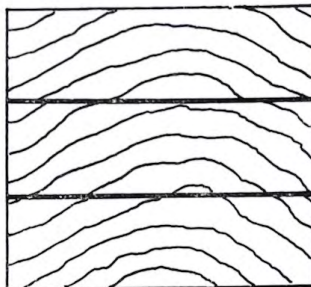
Eksperimentalni dio obuhvatio je pripremu lamela, mikro-klime i ljepila u skladu s planom pokusa, te provođenje samog lijepljenja. U toku izbora lamela (točka 2.1) u pogonu praćen je proces sušenja, kako bi se odredio trenutak uzimanja lamela za tri izabrana nivoa vlažnosti (točka 2.2).



Slika 3. Električni digitalni vlagomjer tvrtke »Bollmann«

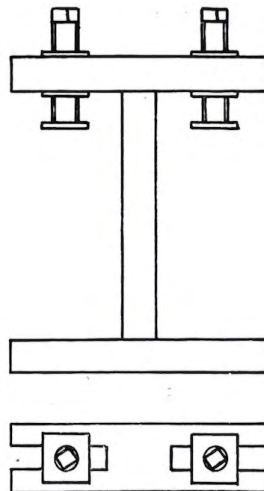
Sušenje je provedeno po režimu uobičajenom u spomenutom pogonu. Početna vlažnost lamela iznosila je 60%. Kontrola vlažnosti izabranih lamela vršena je pomoću digitalnog vlagomjera tvrtke »Bollman« — Zap. Njemačka. Na osnovu te kontrole ustanovljene su znatne razlike u sadržaju vlage unutar pojedinih lamela. Obzirom na to bilo je potrebno izvršiti dodatno kondicioniranje lamela u laboratoriju, u uvjetima koji su odgovarali izabranim nivoima vlažnosti. Nakon završetka kondicioniranja, a prije početka lijepljenja, lamele su obostrano oblanjane na debljinu od 34 mm. Mikroklimatski uvjeti prema planu pokusa (točka 2.2) postignuti su izjednačavanjem temperature i rel. vlage laboratorija s vanjskim uvjetima 15°C, 53—54% rel. vlage, u slučaju postizanja tzv. zimskih uvjeta rada u pogonu. Za postizanje ljetnih uvjeta (25°C, 65—66%) vršeno je zagrijavanje i navlaživanje prostorija. Kontrola mikroklimatskih uvjeta vršena je pomoću termohigrografa. Priprema ljepila obuhvatila je kontrolu viskoziteta i miješanja s odgovarajućim katalizatorom u omjeru 5:1. Kontrola viskoziteta vršena je viskozimetrom po Fordu No 4. Viskoznost ljepila RFK iznosila je 3 min i 28 sek, a ljepila RFR 4 min i 16 sek na nivou zimске mikroklime. Nanos ljepila vršen je ručno pomoću plastične nazubljene lopatice. Kontrola količine ljepli-

va vršena je na decimalnoj vagi nosivosti 10 kg. Od momenta nanosa ljepila mjereno je tzv. otvoreno vrijeme, koje je za sve kombinacije iznosilo 20 min. Nakon toga su po tri lamele međusobno spojene prema sl. 4. Od tog trenutka pa do postizanja željenog pritiska računato je tzv. »zadržano vrijeme«, koje je za sve kombinacije iznosilo 40 min.



Slika 4. Položaj lamela u slijepjenom uzorku

Prešanje lamela izvedeno je u stezačima konstrukcije kao na sl. 5, koji se sastoje od masivnog dijela u obliku slova I i dva zatezna vijka s navojem Tr 48 x 8. Položaj lamela i stezača prikazan je na sl. 6. Pritisak prešanja od 6 kp/cm<sup>2</sup> ostvaren je pomoću pneumatskog pištolja. Lamele su ostavljene pod pritiskom 14 sati. U



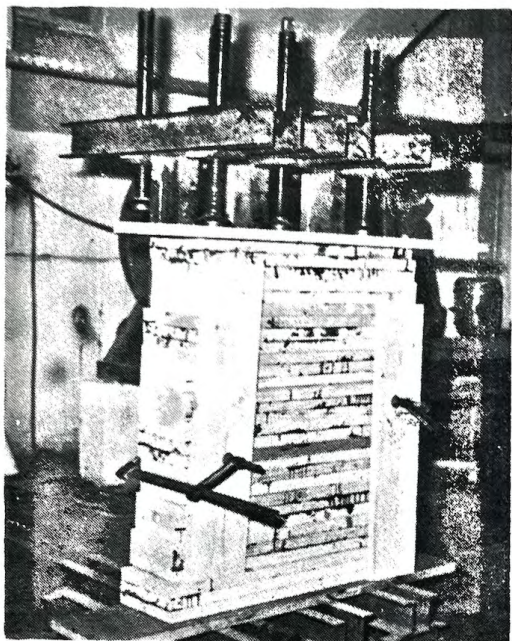
Slika 5. Shematski prikaz stezača lamela

prvom prešanju obuhvaćene su sve kombinacije na nivou zimске mikroklime. Lijepljenje lamela na nivou ljetne mikroklime (25°C, 65%) izvršeno je u stezačima pod istim uvjetima. Prije pripreme ljepila kontroliran je viskozitet, koji je u tim uvjetima iznosio za RFK 2 min i 43 sek, a za RFR 2 min i 44 sek.

Nakon prešanja troslojni uzorci su kondicionirani 7 dana u uvjetima normalne klime (20 ± 2°C, 65 ± 3%), a potom izrezani u epruvete. Po-



stupak s epruvetama za ispitivanje čvrstoće na smicanje, površine smicanja i dubine penetracije opisan je u točki 2.4.



Slika 6. Položaj lamela u stegačima

### 3.0 REZULTATI ISPITIVANJA

#### 3.1 Čvrstoća na smicanje

Dobiveni rezultati za  $n = 12$  epruveta po kombinaciji prikazani su u tablici III.

SREDNJE VRIJEDNOSTI ČVRSTOCE NA SMICANJE

Tablica III

Oznaka kombinacije	čvrstoća na smicanje (kp/cm <sup>2</sup> ) $\bar{x}$	oznaka kombinacije	čvrstoća na smicanje (kp/cm <sup>2</sup> ) $\bar{x}$
A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	52,85	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	56,39
A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>	56,16	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	52,27
A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	53,60	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>	60,81
A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	55,32	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	58,89
A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	63,08	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	69,25
A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	58,96	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	65,33
A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>	69,17	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>	69,25
A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	62,67	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	69,85
A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	59,97	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	58,06
A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	55,34	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	58,11
A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>	64,28	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>	57,88
A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	58,72	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	52,19

Dalja matematičko statistička obrada rezultata obuhvatila je analizu varijance i provođenje F-testa kako je to navedeno u točki 2.3. Vrijednosti za sume kvadrata odstupanja, broj stupnjeva slobode, srednji kvadrat odstupanja i F računski za svaki pojedini utjecajni faktor i svaku moguću interakciju prikazani su u tablici IV.

Tablica IV

Izvor varijacija	Suma kvadrata odstupanja	Stupanj slobode	Procjena varijacije	F rač.	F <sub>0,05</sub>	F <sub>0,01</sub>
A	164,41	1	164,41	5,654	3,88	6,74
B	5453,05	2	2726,53	93,760	3,03	4,72
C	361,09	1	361,09	12,417	3,88	6,74
D	474,01	1	474,01	16,300	3,88	6,74
AB	804,96	2	402,48	13,840	3,03	4,70
AC	31,52	1	31,52	1,084	3,88	6,74
AD	0,30	1	0,30	0,010	3,88	6,74
BC	130,35	2	65,18	2,241	3,03	4,70
BD	195,46	2	97,73	3,361	3,03	4,70
CD	7,70	1	7,70	0,265	3,88	6,74
ABC	477,21	2	238,61	8,205	3,03	4,70
ABD	294,13	2	147,07	5,057	3,03	4,70
ACD	17,27	1	17,27	0,594	3,88	6,74
BCD	66,57	2	33,29	1,115	3,03	4,74
ABCD	113,50	2	56,75	1,952	3,03	4,70
GREŠKA	7677,88	264	29,08			
SUMA	16269,38	287				

Vrijednosti za F<sub>0</sub> vađene su iz statističkih tablica prema [9] za nivo vjerojatnosti 0,05 i 0,01 i za odgovarajući broj stupnjeva slobode brojnika (1 ili 2 ovisno o faktoru) i nazivnika (264). Uspoređujući F računski s F<sub>0,05</sub> tabličnim proizlazi da signifikantan utjecaj na čvrstoću pokazuju faktori A, B, C, D i interakcije AB, BD, ABC, ABD. Pritom vlažnost drva (B) pokazuje daleko najznačajniji utjecaj, a zatim slijedi specifični nanos ljepila (D), interakcija mikroklimi i sadržaja vlage (AB), vrsta ljepila (C) i interakcija mikroklimi, sadržaja vlage i vrste ljepila (ABC). Signifikantan utjecaj, iako znatno manji, pokazuje i mikroklima (A), interakcija vlažnosti drva — nanos ljepila (BD) te interakcija mikroklimi — vlažnost drva — nanos ljepila (ABD). Na nivou vjerojatnosti 0,01 signifikantan utjecaj pokazuje vlažnost drva (B), vrsta ljepila (C), specifični nanos ljepila (D), interakcija mikroklimi i vlage drva (AB), mikroklimi — vlage i vrste ljepila (ABC), te mikroklimi, vlage i specifičnog nanosa (ABD). Svi ostali izvori varijacija nemaju signifikantan utjecaj na čvrstoću smicanja u sloju ljepila.



Stavi li se u odnos protumačeni dio sume kvadrata odstupanja s ukupnom sumom kvadrata odstupanja dobiva se veličina protumačenog dijela ( $r$ ) utjecaja svih faktora kako slijedi:

$$r^2 = \frac{8591,5}{16269,38} = 0,5281$$

$$r = \sqrt{0,5281} = 0,7267 = 72,67\%$$

### 3.2 Ocjena površine smicanja i dubine penetracije ljepila u drvo

Ocjena površine smicanja obuhvatila je zapravo utvrđivanje postotka loma uslijed smicanja po drvu, odnosno ljepilu. Kod svih ispitanih epurveta dolazilo je do loma po drvu na 80—100% površine. Za svaku kombinaciju (uzorak) izračunat je srednji postotak loma po drvu kao kriterij za ocjenu površine. Prema tome kriteriju, svi uzorci su razvrstani u tri grupe kao u tablici V.

Tablica V

Oznaka grupe	Lom po drvu %	Oznaka kombinacije
I	80—90	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>
		A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>
II	90—95	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>
		A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>
		A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>
		A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>
		A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>
III	95—100	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>
		A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>
		A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>
		A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>
		A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>
		A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>

Potpisi pod slike na str. 188—189.

- Slika 7. Vlažnost lamela 14—15%, RFK ljepilo 300 gr/m<sup>2</sup>, povećanje 160 puta
- Slika 8. Vlažnost lamela 14—15%, RFK ljepilo 200 gr/m<sup>2</sup>, povećanje 160 puta
- Slika 9. Vlažnost lamela 14—14%, RFR ljepilo 300 gr/m<sup>2</sup>, povećanje 160 puta
- Slika 10. Vlažnost lamela 14—15%, RFR ljepilo 200 gr/m<sup>2</sup>, povećanje 160 puta
- Slika 11. Vlažnost lamela 9—10%, RFK ljepilo 300 gr/m<sup>2</sup>, povećanje 160 puta
- Slika 12. Vlažnost lamela 9—10%, RFK ljepilo 200 gr/m<sup>2</sup>, povećanje 160 puta
- Slika 13. Vlažnost lamela 9—10%, RFR ljepilo 300 gr/m<sup>2</sup>, povećanje 160 puta
- Slika 14. Vlažnost lamela 9—10%, RFR ljepilo 200 gr/m<sup>2</sup>, povećanje 160 puta
- Slika 15. Vlažnost lamela 6,5—7,5%, RFK ljepilo 300 gr/m<sup>2</sup>, povećanje 160 puta
- Slika 16. Vlažnost lamela 6,5—7,5%, RFK ljepilo 200 gr/m<sup>2</sup>, povećanje 160 puta
- Slika 17. Vlažnost lamela 6,5—7,5%, RFR ljepilo 300 gr/m<sup>2</sup>, povećanje 160 puta
- Slika 18. Vlažnost lamela 6,5—7,5%, RFR ljepilo 200 gr/m<sup>2</sup>, povećanje 160 puta

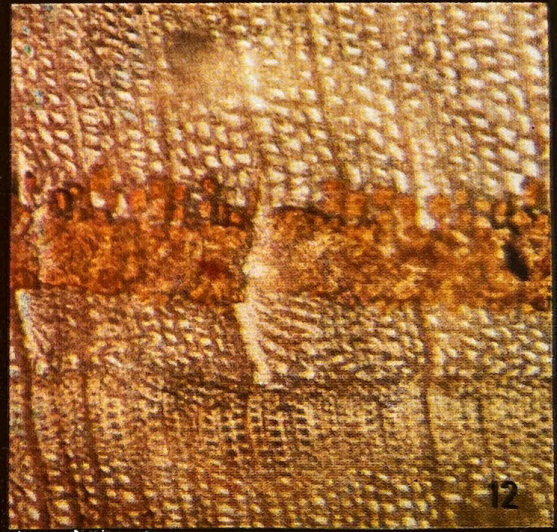
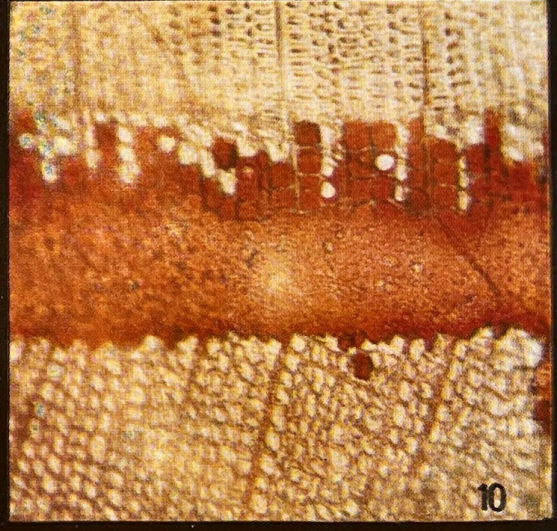
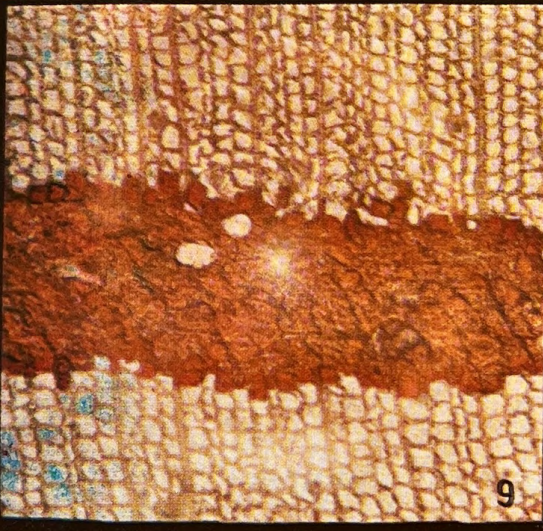
Uspoređivanjem ovih rezultata sa čvrstoćom na smicanje (tablica III), može se uočiti da najveću čvrstoću pokazuju uzorci iz grupe II, nešto manju iz grupe III, a najmanju uzorci iz grupe I.

Promatranje dubine penetracije ljepila u drvo vršeno je na mikrotomskim preparatima pod mikroskopom s prolaznim svjetlom. Na snimljenim fotografijama (sl. 7 do sl. 18) vidljiva je dubina penetracije ljepila u zavisnosti od sadržaja vlage u lamelama, vrste ljepila i specifičnog nanosa ljepila pri lijepljenju u tzv. ljetnoj atmosferi i povećanju od 160 puta. Uočljivo je da dubina penetracije u najvećoj mjeri ovisi o vlažnosti drva, a znatno manje o specifičnom nanosu ljepila. Veću penetraciju u strukturu drva pri istim uvjetima pokazalo je ljepilo RFK.

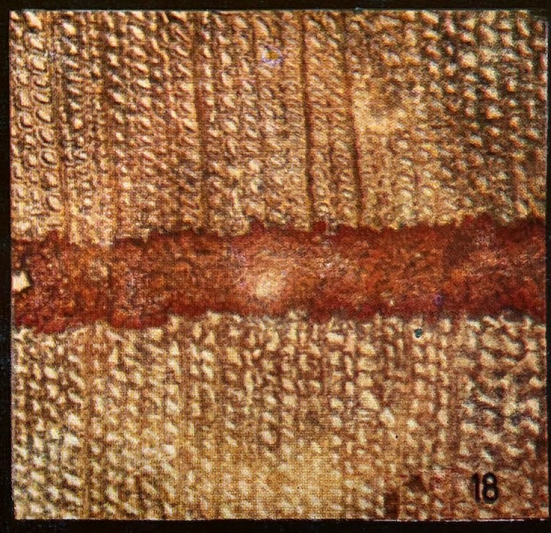
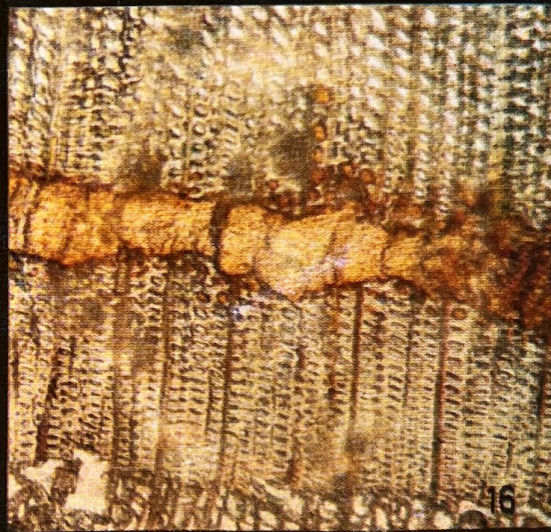
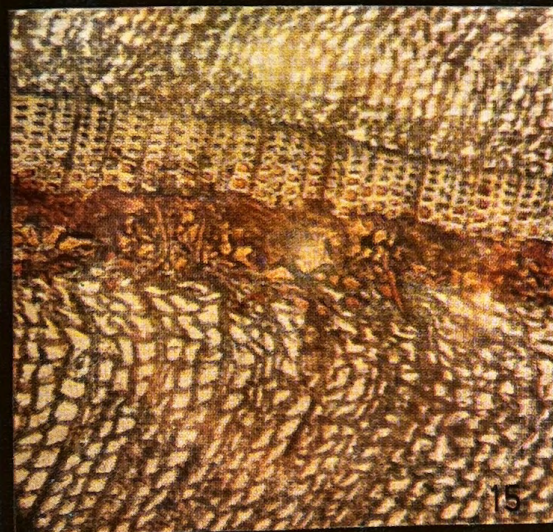
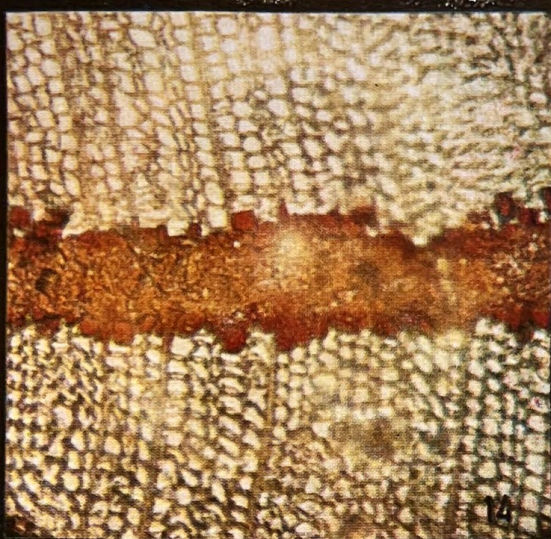
### 3.3 Analiza rezultata

Na osnovu provedenog ispitivanja protumačen je utjecaj većine faktora (72,67%) na kvalitetu lijepljenja lamela iz masivnog drva jele/smreke. Ako se analiziraju rezultati po kombinacijama (tablica III) uočavaju se relativno visoke čvrstoće na smicanje. Naime, sve vrijednosti zadovoljavaju postojeće propise o osiguranju kvalitete lameliranog građevnog drva RAL-RG 421 u pogledu čvrstoće na smicanje, jer se nalaze iznad dozvoljene minimalne vrijednosti od 40 kp/cm<sup>2</sup>. Utjecaj pojedinih faktora i njihovih interakcija bio bi izrazitiji da je upotrijebljen veći raspon između nivoa pojedinog faktora. Posebno to vrijedi za mikroklimu (A), no ovdje iz tehničkih razloga nije bilo moguće u plan pokusa ući s većim rasponom. Unatoč ove konstatacije, moguće je na bazi dobivenih rezultata uočiti određene zavisnosti čvrstoće na smicanje i utjecajnih faktora, kako je prakazano na sl. 19 i sl. 20. Na slici 19 prikazana je ovisnost čvrstoće o sadržaju vlage, vrsti ljepila i specifičnom nanosu u ljetnim uvjetima rada, a na sl. 20 u zimskim uvjetima. Čvrstoća na smicanje na oba nivoa mikroklime postiže svoj optimum oko nivoa vlažnosti 9—10%, bez obzira na nivo djelovanja ostalih faktora (vrste ljepila i specifičnog nanosa). Uočena pojava smanjenja čvrstoće s povećanjem sadržaja vlage od nivoa B<sub>2</sub> (9—10%) na B<sub>3</sub> (14—15%) objašnjava se većom penetracijom ljepila u strukturu drva uslijed smanjenja viskoziteta nanesenog ljepila, tako da za aktivno vezanje drva ostaje premala količina ljepila, ili u ekstremnom slučaju može doći do tzv. »gladnog spoja« (sl. 7, 8, 9 i 10). Do smanjenja čvrstoće spoja može doći i zbog preniske vlage drva. U tom slučaju dolazi do slabijeg kvašenja drva, što ima za posljedicu manju penetraciju ljepila u drvo (sl. 15, 16, 17 i 18). U području vlažnosti 9—10%, kako je već rečeno, čvrstoća na smicanje postiže svoj optimum, a dubina penetracije ljepila je upravo

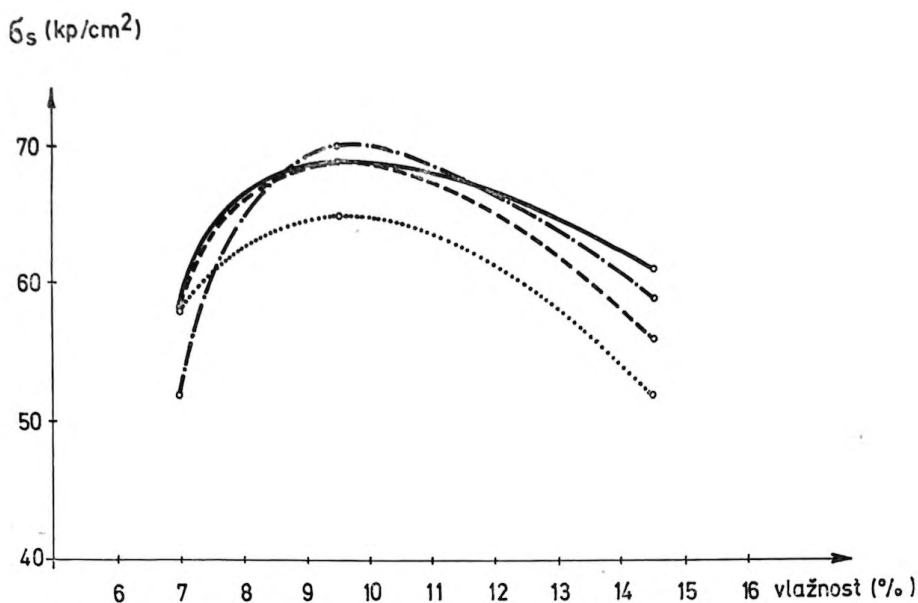








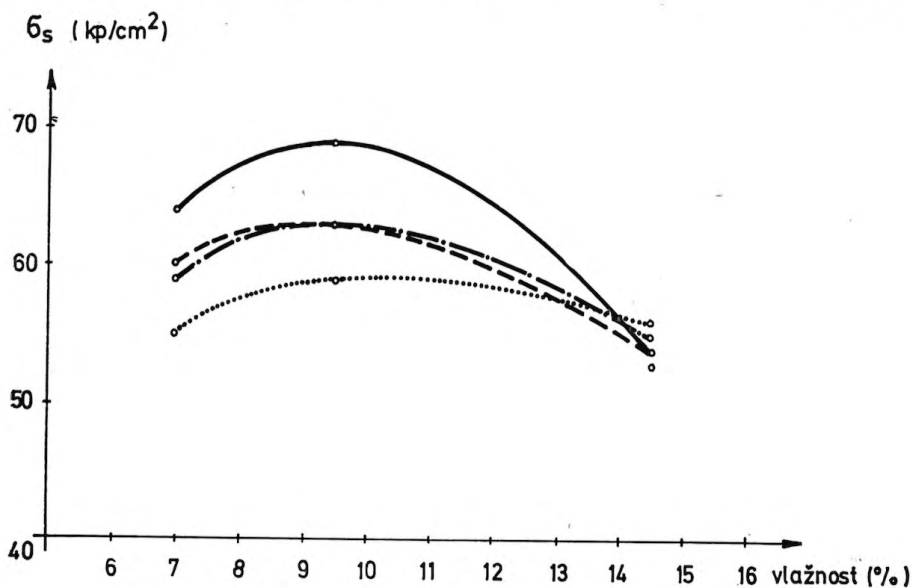




▲ Slika 19. Čvrstoća na smicanje u ovisnosti od vlage drva, vrste ljepila i specifičnog nanosa kod rada u »ljetnoj« mikroklimi.

- RFR 300 g/m<sup>2</sup>
- · - · - RFR 200 g/m<sup>2</sup>
- RFK 300 g/m<sup>2</sup>
- ..... RFK 200 g/m<sup>2</sup>

▼ Slika 20. Čvrstoća na smicanje u ovisnosti od vlage drva, vrste ljepila i specifičnog nanosa kod rada u »zimskoj« mikroklimi.





toliko dobra (sl. 11, 12, 13 i 14) da se postiže velika kontaktna površina. Znatan utjecaj na kvalitet lijepljenja pokazale su interakcije vlage s mikroklimom (AB), te vlage, mikroklimi i vrste ljepila (ABC). Da bi se isključio utjecaj mikroklimi, neophodno je osigurati da se lijepljenje lamela vrši u približno konstantnim mikroklimatskim uvjetima u pogonu, što zahtijeva kondicioniranje radnog prostora. Na osnovu dobivenih rezultata proizlazi da se područje optimalne klima nalazi bliže tzv. ljetnoj klimi. Stoga bi bilo poželjno da se srednja temperatura u radnom prostoru održava na nivou od 20°C. Za bolje osvijetljavanje međusobnog djelovanja vlage, mikroklimi i tzv. otvorenog vremena čekanja, bilo bi potrebno provesti dalja ispitivanja.

Signifikantnost utjecaja vrste ljepila (C) ukazuje na postojanje razlika između dva ispitana ljepila RFK i RFR. S ljepilom RFR u odnosu na RFK dobiveni su u ovim uvjetima ispitivanja povoljniji rezultati. To, međutim, nije dovoljno za kompleksnu ocjenu kvalitete ljepila. Uključivanjem otvorenog vremena čekanja kao utjecajnog faktora stvorila bi se mogućnost da se faktorskim planom pokusa istraže optimalni uvjeti za upotrebu svakog od analiziranih ljepila. Ovo pitanje je ostalo otvoreno i potrebno ga je uključiti u jedan od narednih istraživačkih zadataka.

Signifikantnost utjecaja specifičnog nanosa ljepila (D) i njegove interakcije s mikroklimom i vlagom (ABD) također je u uvjetima ovog ispitivanja dokazana. Povoljniji rezultati dobiveni su kod specifičnog nanosa od 300 gr/m<sup>2</sup>. U jednom od narednih ispitivanja pitanju interakcije s vlagom i otvorenim vremenom čekanja trebalo bi posvetiti posebnu pažnju. Dobiveni rezultati ukazuju na mogućnost da se, uz primjenu odgovarajućeg plana pokusa, i u konkretnim pogonskim uvjetima mogu s visokom vjerojatnošću istražiti optimalne granice za određene tehnološke parametre.

#### 4.0 ZAKLJUČAK

Na osnovu provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata proizlazi da na kvalitetu lijepljenja la-

mela jele/smreke s ljepilima na bazi rezorcini fenolformaldehida najveći utjecaj pokazuje sadržaj vlage u lamelama. Signifikantnost utjecaja ostalih faktora i nekih njihovih međusobnih interakcija također je dokazana, pa bi o tome kod daljih ispitivanja trebalo voditi računa.

Za bolje osvijetljavanje ove problematike, posebno kada se radi o vlazi u interakciji s vrstom ljepila, mikroklimom, specifičnim nanosom i otvorenim vremenom čekanja, trebalo bi provesti dalja istraživanja s više nivoa pojedinih faktora. Ovakvim bi se pristupom bolje objasnili problemi i neke zakonitosti u tehnici lijepljenja drva, koje bi mogle biti posebno interesantne kako za proizvođače ljepila tako i za proizvođače lameliranih drvenih konstrukcija.

#### LITERATURA:

1. BACKOVIĆ, M.: Utjecaj faktori na proces i kvalitet lijepljenja furnira, Sarajevo 1976.
2. FERDELJI, V.: Ispitivanje međusobne ovisnosti toplinske obrade i sposobnosti lijepljenja nekih domaćih vrsta drva. Diplomski rad 1980, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
3. HOUWINK, R., SALOMON, G.: Adhesion and adhesives, London 1967.
4. KATOVIĆ, Z., ČIĆ, Đ., PETROVIĆ, S.: Neka zapažanja o sintetskim ljepilima na bazi fenolnih smola u proizvodnji vodo otpornih šperploča, »Drvna industrija« 22 (1971), 3—4, str. 58—65.
5. KLEMM, H.: Verleimungen im Holzleimbau, Adhäsion, H. 2, 1973.
6. KOVALJČUK, L. M.: Proizvodstvo derevennih kleennjih konstrukcij, Moskva »Lesnaja promyšlenost« 1979.
7. LINDER, A.: Planen and Auswerten von Versuchen.
8. NALIMOV, W. W.: Theorie der Versuchsplanung, Moskva »Nauka« 1971.
9. PANTELIC, I.: Uvod u teoriju inženjerskog eksperimenta (Univerzitet Novi Sad, 1976.).
10. PECINA, H.: Holzfeuchte und Klebung, Teil I: Das Zusammenwirken der Holzfeuchte mit anderen Faktoren bei der Holzklebung, Holztechnologie 11 (1970), 2.
11. PECINA, H.: Holzfeuchte und Klebung Teil II: Das Bindefestigkeitsverhalten einiger Holzklebstoffe bei verschiedenen Holzfeuchte, Holztechnologie 11 (1970) 3.
12. PLATH, E.: Die Holzverleimung. Wiss. Verlagsgess, M.B.H., Stuttgart 1951.
13. SIMON, G.: Die Kohäsion von Klebstoffen, Adhäsion 4 (1974).
14. SIMON, G.: Über die Adhäsion, Adhäsion 7/8 i 9 (1975).
15. SIMON, G.: Über die Klebrigkeit, Adhäsion 3 (1976)