

Montažni spoj veze ugla lameliranih drvenih okvira — II. dio*

A JOINING DETAIL OF CORNER CONNECTION OF GLULAM PORTAL FRAMES (II PART)

Prof. dr. Zvonimir Žagar

Fakultet građevinskih znanosti — Zagreb

UDK 630:832.286:630:824.8

Prispjelo: 12. ožujka 1989.

Prihvaćeno: 15. travnja 1989.

Prethodno priopćenje

Sažetak

U prvom je dijelu [5] s teorijskog aspekta prikazana nova veza elemenata ugla lameliranih okvira, kojom bi se zamijenila tradicionalna veza trnovima u kružnom rasporedu.

Ovdje je dan opis ispitivanja u laboratoriju Zavoda za tehničku mehaniku, FGZ, provedenih na uzorku naravne veličine, te komparativni rezultati simulacijskih istraživanja, provedenih na numeričkom modelu konačnih elemenata sustavom ICES STRUDL 2. Ti se rezultati podudaraju. Model KE kasnije je adaptiran u smislu isključenja pojedinih zona, a prema stvarnim opažanjima testa u laboratoriju. Nedostaci testa uklonit će se u naknadnim laboratorijskim istraživanjima koja su u toku.

Ključne riječi: spoj veze ugla — lamelirani drveni okviri — simulacijska istraživanja — poprečno prednapinjanje spoja.

Summary

In the first [5] a new detail of corner connection of glulam portal frames has been shown theoretically which would substitute the conventional circularly placed connection bolts. Here we have described the testing done in the laboratory for the Technical Mechanics of the Institute for Civil Engineering carried out on a sample in natural size, as well as the comparative results of numerical simulation carried out on a numerical finite element 3D model by the use of IBM ICES STRUDL 2 system. The results conform. The FE model has been later adapted to the actual observations of the lab tests. The imperfections of the test will be eliminated in additional lab investigations which are in progress.

Key words: a joining detail of corner connection — glulam portal frames — simulating investigations — cross prestressing of glued connection (A. M.)

UVOD

Ispitivanje lijepljenog sustava ugla lameliranih okvira uz poprečno prednapinjanje spoja obavljeno je u laboratoriju. Paralelno s tim, rađene su digitalne simulacije na modelu od 3D-konačnih elemenata (KE) koristeći se IBM ICES STRUDL 2 sustavom.

Taj 3D (trodimenzionalni) model KE uzet je kao idealizirani sustav 1/2 čvora (da bi se smanjio broj konačnih elemenata). To je bilo moguće jer se može iskoristiti simetrija spoja. Laboratorijska ispitivanja provedena su do sloma spoja. Naknadno se tzv. idealni model KE reducirao, kako bi se na osnovi laboratorijskog istraživanja model u stanju sloma adaptirao stvarnom stanju isključivanjem vlačnih zona filma ljepila. Ustanov-

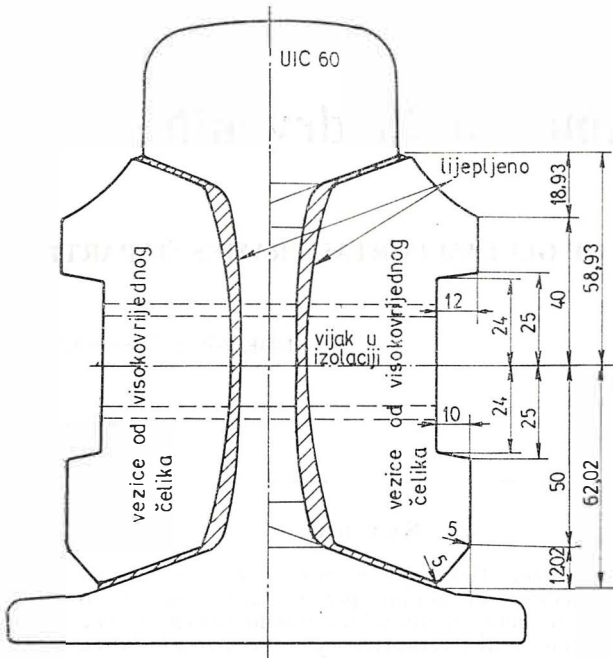
ljena je dobra podudarnost laboratorijskog testa i 3D-simulacije KE.

Također je ustanovljen neosporan doprinos poprečnog pritezanja spoja, te utvrđena potreba pronalaznja mogućnosti održavanja te sile konstantnom u toku vremena. Ustanovljene su i manje manjkavosti u izvođenju spoja. S obzirom na to da je ispitivan samo jedan uzorak, odlučeno je da se i lijepljenje i pritezanje vijaka spoja obavi u laboratoriju i cijeli test još jedamput ponovi.

1. POTREBA POPREČNOG PREDNAPINJANJA SPOJA

Iskustva koja smo primijenili pri lijepljenju uglovne veze nosača nadovezuju se na istraživanja lijepljenja izoliranih šinskih nastavaka, provedena još 1970—1971. u sklopu istraživanja tadašnjeg Poduzeća za pruge i pružna postrojenja — ŽTP-a Zagreb, te na ispitivanja provedena u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Nažalost, rezultati tih ispitivanja nisu objavljeni.

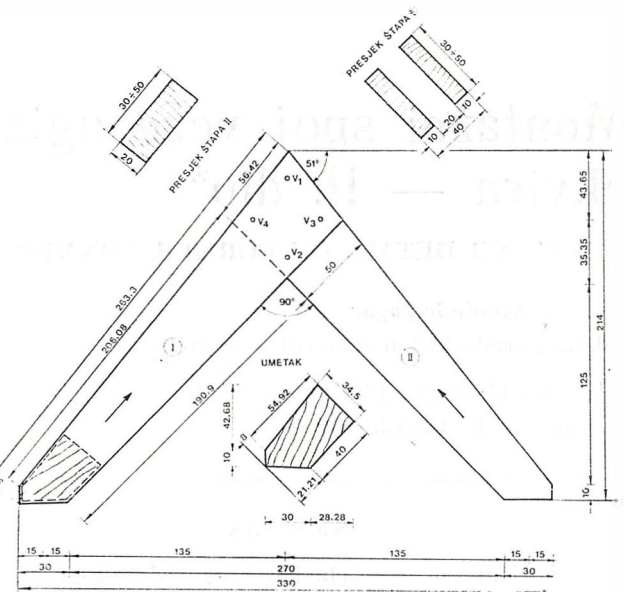
* Cijelo je istraživanje rađeno u sklopu diplomskog rada kandidata D. Hranja. U laboratorijskim ispitivanjima sudjelovala je ekipa Odjela za drvene konstrukcije Zavoda za metalne i drvene konstrukcije (Haiman, Magerle, Baljkas), a iz Zavoda za tehničku mehaniku sudjelovali su Duboković i Herceg. Pomoć pri modeliranju na RC INUG-a kandidatu pružio B. Baljkas. Neki su dijagrami priređeni na osnovi rezultata analize KE T. Cvitića.



Slika 1. Lijepljeni šinski sastav
Fig. 1 Glued rail joint

Da bi se ostvario lijepljeni šinski sastav do sjaja pjeskarene, lijepljene plohe između vezica od visokovrijednog čelika i šine, na staklenu se foliju (voal) moralo nanijeti epoksidno ljepilo, a spoj se zatim fiksirao pritezanjem serije visokovrijednih vijaka. Pritezna se sila mjerila torzionim ključem. U tom slučaju folija staklenog voala imala je funkciju:

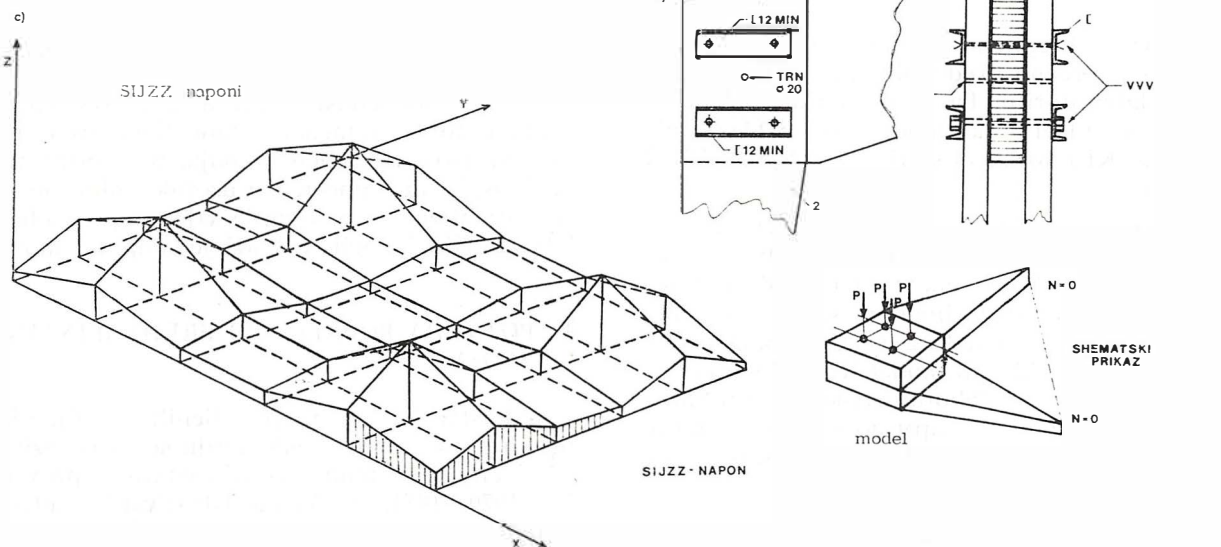
- a) izolacije šine od vezice (što je i bio glavni uvjet sastava),



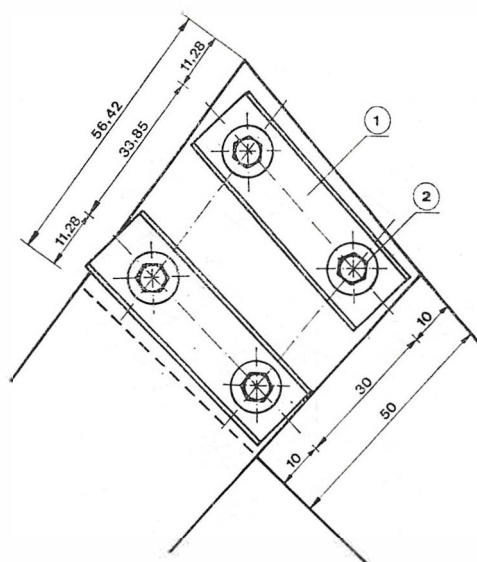
Slika 3. Model za ispitivanje u laboratoriju: globalne dimenzije i prikaz modela: V1, ... V4 položaj vijaka za prednaprezanje spoja
Fig. 3. Model for lab testing: global sizes and model review; V1, ... V4 arrangement of the bolts for prestressing of joint

- b) ispunjavanja neravnih površina metala (pjeskarenjem prethodno očišćenim do sjaja) (sl. 1).

Dinamička ispitivanja provedena u laboratoriju za ispitivanje materijala Strojarskog fakulteta u Zagrebu pokazala su da takav spoj može podnijeti i do 45 milijuna oscilacija, te u načelu ima istu dinamičku čvrstoću kao i izvorni materijal. Lom materijala ravnomjerno je zahvatio materijal šine, vezice i ljepilo. Statička ispitivanja pokazala su iste rezultate.



Slika 2. Poprečni pritisak na rešku/film ljepila u reški ljepila: a) realizacija sile (pogled), b) presjek kroz spoj, c) dijagram pritiska u reški (od sila P vijaka u spoju: nakon SIJZZ)
Fig. 2. Cross pressure on the glue joint: a) effect of force (view), b) section through joint c) diagram of pressure in the joint (from P force of bolts in the joint): SIJZZ stress



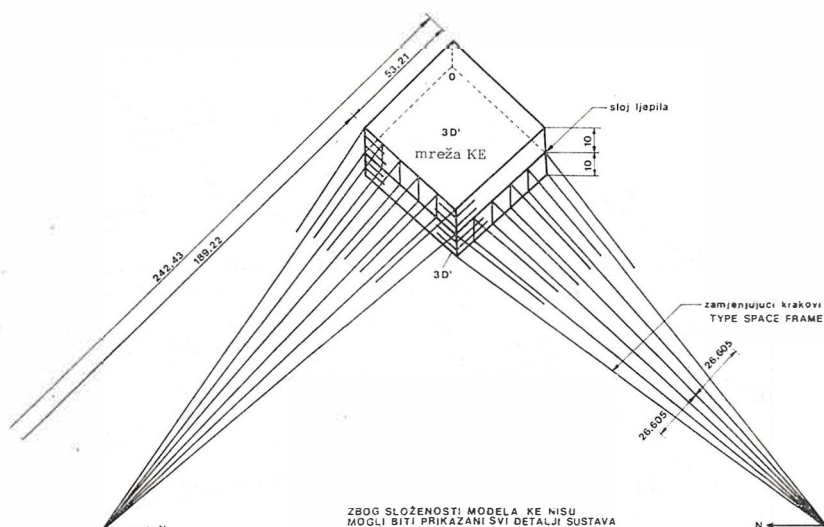
- ① profil [16x 500 4 kom
 ② vijak M 16; l = 460mm 4 kom.

Fig. 4. General detail of corner connection
 Fig. 4 General detail of corner connection

Ideja poprečnog pritezanja spoja primijenjena je i pri spajanju lameliranih elemenata uglovnog spoja okvirnih nosača [5]. Sile u priteznim vijcima imaju funkciju održavanja filma ljepila u stanju kompresije (tlaka), sprečavajući opasna vlačna naprezanja okomito na film ljepila i, naravno, okomito na vlakna materijala. Da bi se mogle kontrolirati sile pritezanja u vijku, kao i pad te sile u toku vremena, na vijke su nalijepljeni tenzometri (mjerna traka). Na taj se način mogla pratiti sila pritezanja u vijcima za vrijeme pritezanja, kao i naknadni pad te sile u toku vremena.

Mjerenja su pokazala da se osnovna (početna) pritezna sila u vijku od 2370 N u toku prvog dana smanjila za oko 20%, te se na toj razini zadržala sve do dana ispitivanja, oko mjesec dana kasnije. U tom je razdoblju spoj iz radionice DIP-a GAJ (u Voćinu) prebačen u laboratorij za ispitivanje materijala FGZ, Zagreb. Neposredno prije ispitivanja sila poprečnog naprezanja spoja dovedena je na razinu vrijednosti 2300 N/vijku. Korišteni su vijci \varnothing M16. Pritezna sila ostvaruje prosječni napon tlaka okomito na vlakna (i na film ljepila) od oko 34 N/cm². Distribucija te sile je neravnomjerna i naprezanje okomito na vlakna najveće je u neposrednoj blizini vijka, kako je prikazano na dijagramu (sl. 2), a dobivena je kompjutorskom simulacijom. Ta se sila prenosila preko 2 U-profila 16x500 sa svake strane spoja, kako je prikazano na sl. 3 i 4. Slika 3. prikazuje model koji je ispitivan, a na slici 4. vidi se detalj nacrtava čvora u kojemu se vidi sustav za poprečno naprezanje spoja.

Kako se kasnije u simulacijama KE vidi, u spoju u kojemu nema poprečnog prednaprezanja



Slika 5. Opći (digitalni) model za ispitivanje metodom konačnih elemenata ICES STRUDEL-om (na INUGu)

Fig. 5 General (digital) model for testing by finite elements method ICES STRUDEL (on INUG)

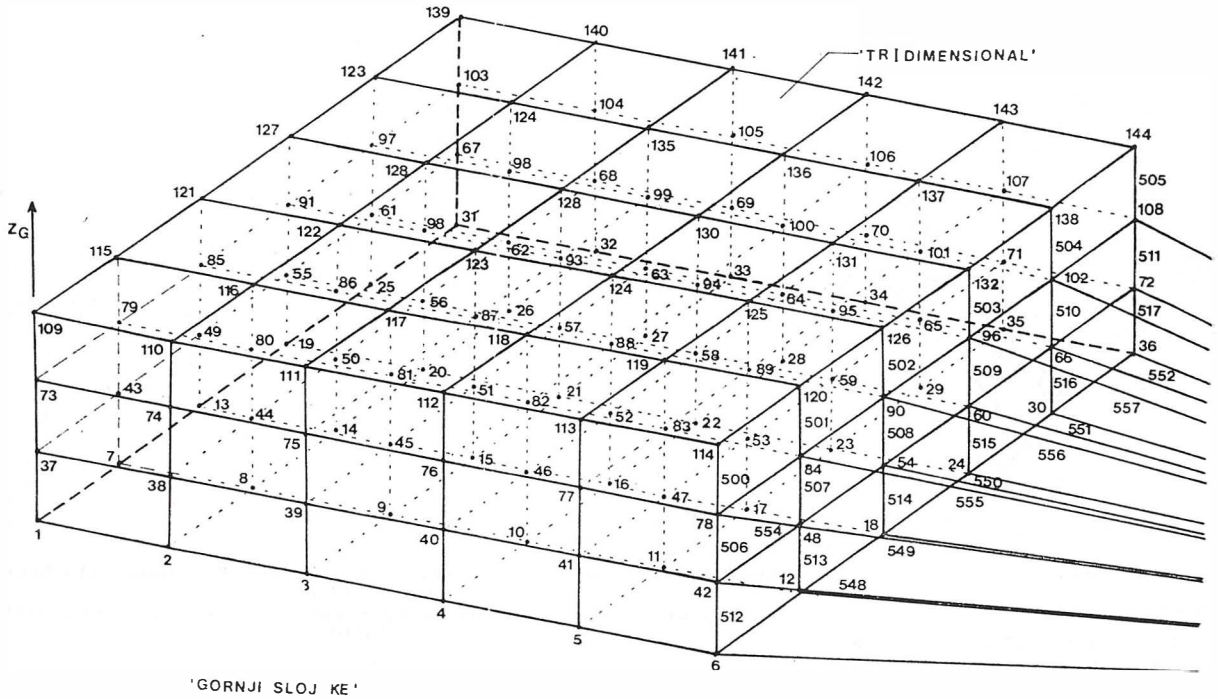
javlja se vlak okomito na vlakna i okomito na film ljepila, koji uzrokuje razljepljivanje spoja. Taj vlak okomito na vlakna javlja se zbog prostornog djelovanja napadnih sila i njihova ekscentriciteta u odnosu prema ravnini prilaganja sila u čvoru.

Taj je fenomen dobro poznat iz ispitivanja i teorije vlačnog nastavka s dvostranim vezicama, pri kojemu postoji skretanje sila iz srednjeg elementa u vezice. Zbog ekscentriciteta sile javlja se savijanje vezice, a onda, naravno, i vlak u rubnim vijcima (ili spajalima) veze, odnosno savijanje vezice. Taj je fenomen svestrano ispitivan, a našao je odraz i u standardima za proračun drvenih konstrukcija.

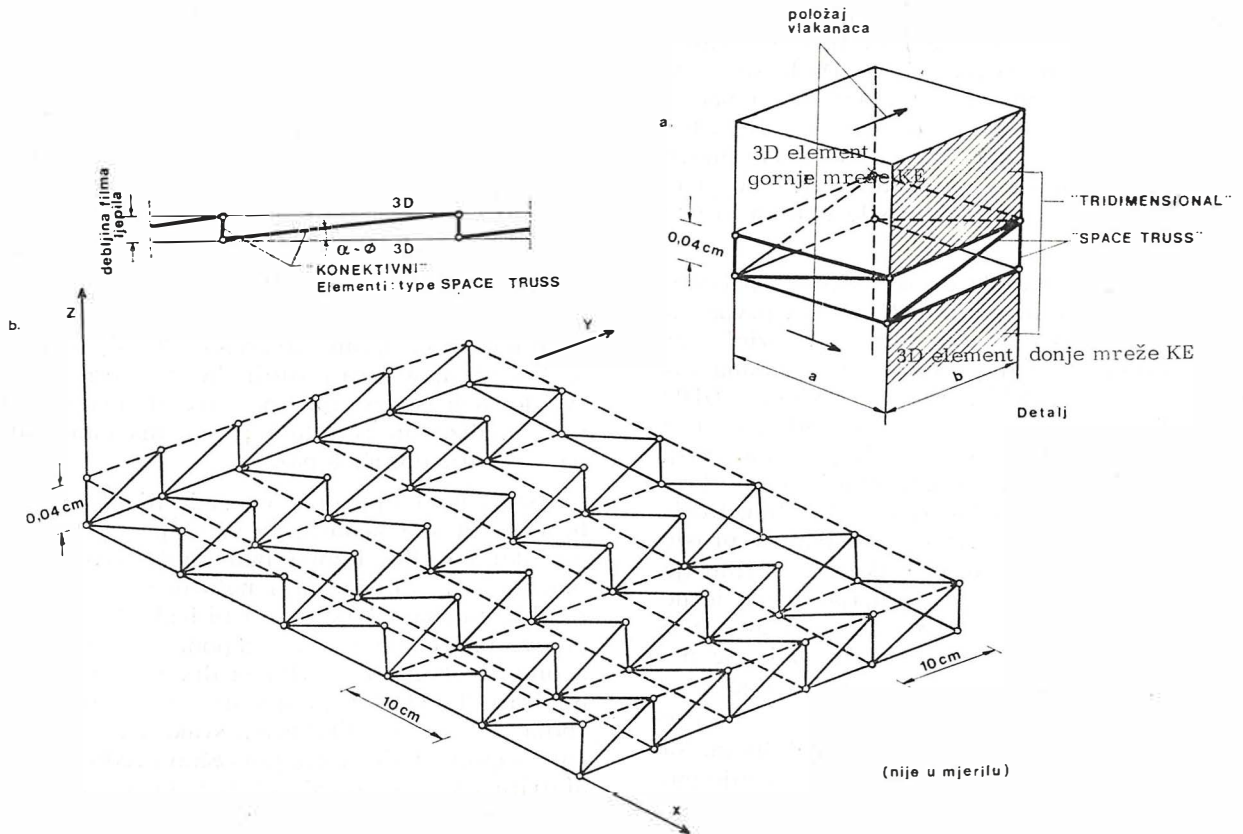
U uglovnom spoju ostvarenom lijepljenjem ploha lameliranog drva postoji sličan fenomen, samo sve do ovih ispitivanja i podrške 3D-analizom KE i do analize tih rezultata proračuna (simulacije) na to se nije obraćala pažnja.

Isti fenomen postoji i pri radu lijepljenoga izoliranog šinskog sastava, pa se ideja o poprečnom pritisku na film ljepila nametnula sasvim automatski i pri dizajniranju uglovnog spoja lameliranih elemenata koje smo ispitivali. Taj fenomen pojave poprečnih vlačnih napona na film ljepila, a onda i okomito na vlakna drveta, mora se eliminirati TRAJNIM poprečnim prednaprezanjem spoja, kako bi se eliminirala svaka pojava tih vlačnih napona. Osim toga, poprečno prednaprezanje aktivira i trenje između elemenata u spoju i pridonosi povećanju nosivosti spoja.

Pri razaranju spoja primijećeno je da je pri lomu spoja isključivo spoj nosio na trenje (kad su već popustile lijepljene plohe, dakle lijepljenje).



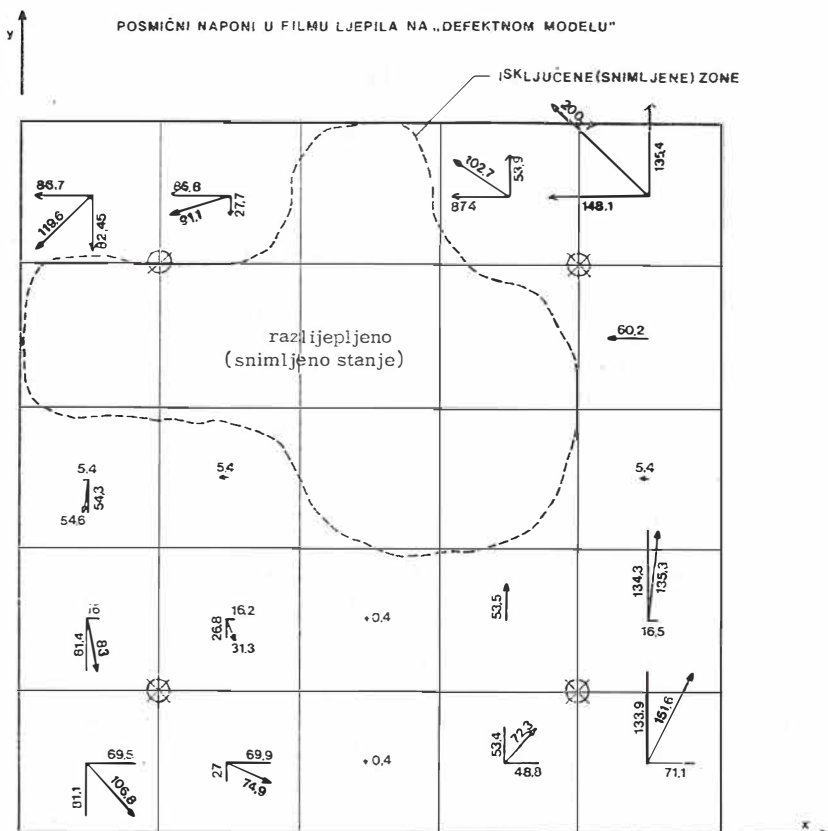
Slika 6. Detalj 3D-mreže konačnih elemenata (gornji sloj)
 Fig. 6. Detail of the 3D finite element mesh (top layer)



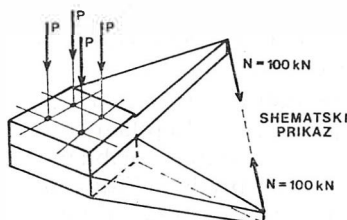
Slika 7. Modeliranje filma ljepila između dviju mreža 3D-konačnih elemenata. U IBM-verziji ICES STRUDLa/INUG ta se veza mogla modelirati SPRING elementima, no tada se ne bi neposredno dobile sile ni naponi u filmu ljepila. Primijenjeni su »konektivni« TYPE SPACE TRUSS elementi.
 Fig. 7. Modeling of the glue film between two meshes of 3D-finite elements. In the IBM-version ICES STRUDL/INUG this connection could be modelled with SPRING elements, however no direct forces or stresses could be thus obtained in the glue film. The »connective« type space truss elements have been applied.

Slika 10. Model 3. Defektni model. U modelu su isključene razlijepljene vlačne zone filma ljepljiva. Dijagram posmičnih napona u filmu ljepljiva. Označena je defektna-razlijepljena zona spoja koja ne sudjeluje u prijenosu posmika.

Fig. 10. Model 3. Defective model. In the model are excluded the unglued tensile zones of glue film. Diagram of shear stress in the glue film. A defective-unglued zone of a joint taking no part in shearing transfer has been marked.



Model



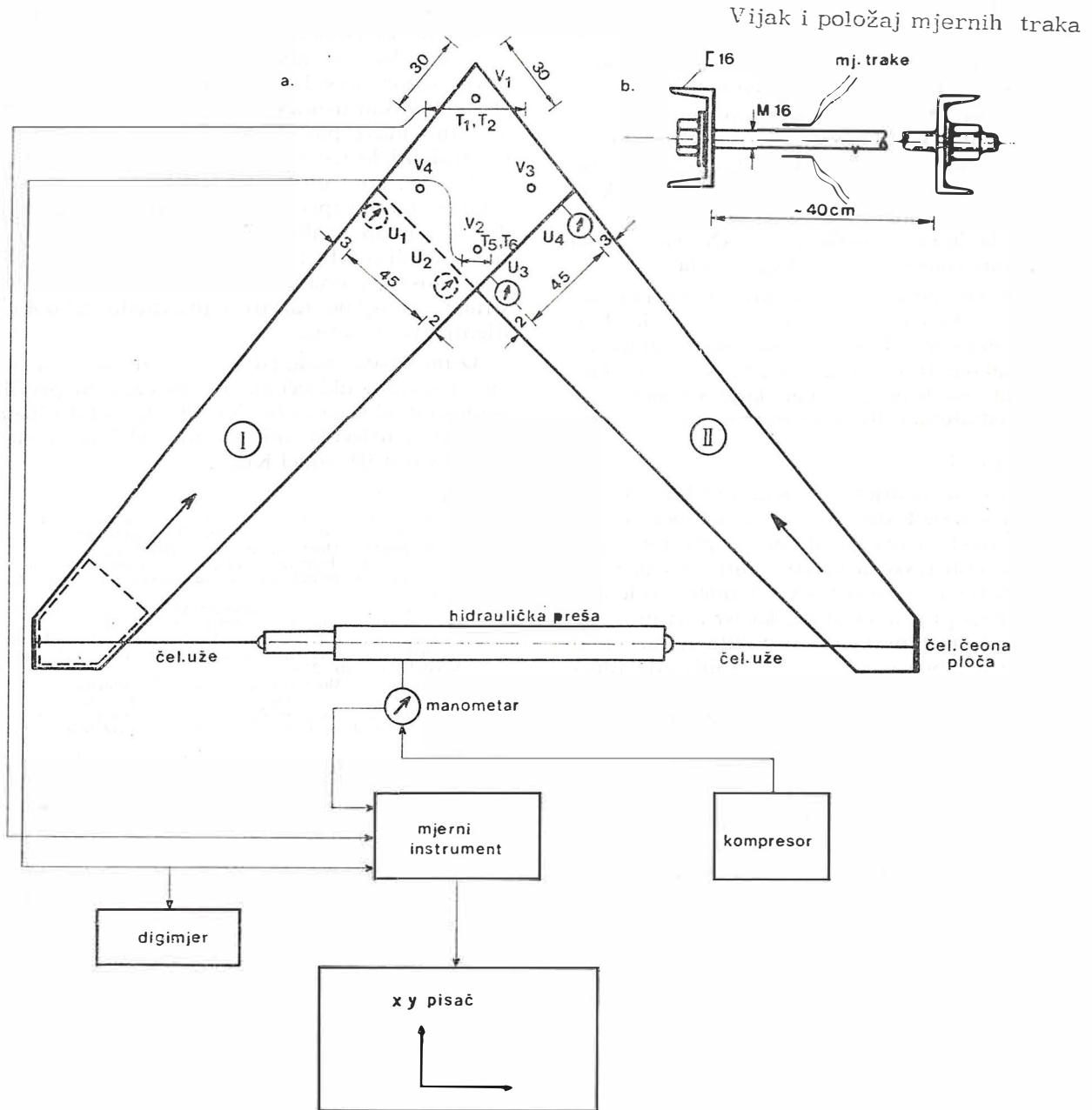
Pri promatranju modela pod 1. i 2. nije bilo dilema oko modeliranja. Provedba modela pod 3. rezultirala je iz pregleda razorenih lijepljenih ploha, gdje je konstatiran poprečni vlak i razlijepljivanje ploha. To razlijepljivanje konstatirano je vizualnom inspekcijom. Najprije se smatralo da se spoj razlijepio zbog greške u lijepljenju epoksidom. Međutim, simulacija 3D modela pod 1 pokazala je da se unatoč priteznim vijcima javljaju zone poprečnog vlaka na film ljepljiva. Te zone vlaka podudarne su zonama ustanovljenim vizualnom inspekcijom razorenog modela. Ipak je sumnjivo to da ljepljivo nije penetriralo u dubinu plohe. Kod modela 2. te su zone mnogo izražajnije. Ustvari poprečni vlak u ljepljivu uzrokuje početna razaranja modela. Taj se tren mogao pratiti i na tenzometrima vijka, kad se na mjernom instrumentu mogao uočiti nagli porast sile u vijku, a na mikrouorama se mogao vidjeti nagli porast kuta zaokreta. Dalje ponašanje modela moglo se zatim pratiti na modelu opisanom pod 3, u kojemu

su dijelovi ploha ljepljiva (tj. štapova kojima se imitira ljepljivo) učinjeni inaktivnim.

Karakteristične posmične plohe i vrijednosti TAU-napona vidljive su na slikama.

3. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

Model je priređen u hali DIP GAJ u Voćinu. Lijepljenje ploha obavljeno je epoksidnim ljeplivom koje je nanoseno obostrano na voal staklene tkanine. Zatim su vijcima (na koje su bile priključene po 2 mjerne trake), plohe pritegnute na određenu silu od 2400 N/vijku. Pritezna je sila praćena pomoću instrumenta na koji su bile priključene mjerne trake. Zatim je nakon jednog sata praćen pad sile. Ustanovljeno je da je taj pad sile iznosio 20% i da je tokom dana ostao na istoj razini. To je konstatirano i nakon mjesec dana, kad je uzorak transportiran u laboratorij TM, gdje se provodilo daljnje istraživanje.



Slika 11. Skup pripremljenih uređaja laboratorijskog modela i testa.
Fig. 11. Set up of the lab model and test.

Skup pripremljenih mjernih uređaja prikazan je na slici 11.

Mjereni su naponi u vijcima i deformacije spoja (međusobno zakretanje lijepljenih elemenata).

Sila prilagana hidrauličnom prešom nanošena je postepeno, u koracima, s pauzama između koraka porasta sile, da bi se dalo vremena da se film ljepila »smiri«, što je praćeno instrumentima. Pri sili od 40 kN model se slomio, što se manifestiralo naglim porastom sile u pritezним vijcima. Nakon toga spoj je rasterećen da bi se zatim ponovno nanosila sila, sve do razaranja modela. Sila razaranja iznosila je približno 60 kN. Pošto se spoj rastavio, primijećeno je da ljepilo

nije prionilo na oko 1/3 površine spoja. Pažljivim pregledom i primjenom rezultata simulacije ustanovljeno je da je upravo u tim zonama nastao poprečni vlak u filmu ljepila i da je zapravo na tim mjestima došlo do razljepljivanja. Unatoč tome, što je i simulacijom dokazano, smatramo da nije došlo do potpune penetracije ljepila u materijal drva, tj. da je lijepljenje bilo loše izvedeno. To će tek potvrditi naknadni eksperimenti koji su u toku. Kako god bilo, vjerojatno je to lijepljenje izvedeno onako kako bi se izvodilo i u praksi.

Obavljene su i neke predradnje koje su omogućile praćenje sile vlaka u vijcima kojima se

poprečno prednapreže spoj, no to je bio rutinski laboratorijski posao, pa se to ovdje ne analizira.

Cijeli je postupak dokumentiran i fotozapisom, o čemu će se izvijestiti na drugom mjestu.

S obzirom da uzorak nije uništen, cijeli će spoj nakon blanjanja lijepljenih površina biti ponovno zalijepljen i ispitan. Lijepljenje će se provesti u laboratoriju, gdje je moguće strogo kontrolirati nanos ljepljiva. Prema rezultatima testiranja, sila loma iznosila je 40 kN, što prema proračunima iskorištava čvrstoću ljepljiva.

Za isti spoj koji bi bio ostvaren trnovima bilo bi potrebno 15 trnova $\phi 16$ mm raspoređenih u kružnom spoju $r=43$ cm, s međusobnim minimalnim razmakom trnova oko 9,4 cm. Nije potrebno upozoravati na brojne uštede koje se mogu ostvariti predloženim lijepljenim spojem.

4. ZAKLJUČAK

Ne mogu se donijeti konačni rezultati na osnovi samo jednog testa provedenog u laboratoriju. Nažalost, takvi su testovi skupi, pa pri današnjoj razini novčanih teškoća privrede nije moguće osigurati veća financijska sredstva. Numeričko je modeliranje poduprlo laboratorijska istraživanja, što je omogućilo interpretaciju rezultata istraživanja obavljenih u laboratoriju. Ta su ispitivanja rađena u sklopu znanstvene teme unapređenja drvenih konstrukcija, i svakako u cilju tog unapređenja.

S obzirom na dosadašnja iskustva, naša smo nastojanja usmjerili prema lakšem određivanju pritezne sile u vijcima spoja. U prethodnoj fazi tu smo silu mjerili mjernim trakama i odgovarajućim uređajima. Međutim, smatramo da tu silu treba mjeriti tzv. senzorskim podložnim pločicama, kao što se u svijetu radi pri unošenju sile u

visokovrijedne vijke u spojevima čeličnih konstrukcija, ili pomoću split-ring-spirale i podložne pločice u koje se klinastom pločicom može ustanoviti zazor, a onda i sila u vijku. Naša smo nastojanja zasad usmjerili prema proizvodnji (i baždarenju) takve pločice (pločica), čime bi se znatno pridonijelo jednostavnijem načinu unošenja sile u vijak, kontroli te sile u toku vremena, kao i radu na terenu (pri primjeni takvog spoja). Također se nastoji analizirati i ostale rezultate numeričkih analiza KE, kao što je iscrtavanje trajektorija unosa napona kroz 3D-medij, a s praktične strane nastojimo razviti i praktičnu tehnologiju lijepljenja »in situ«.

Osim navedenoga, istraživanja modela KE sada idu u smjeru uključenja U 160 čeličnih profila i podložnih pločica u model KE, te detaljnijeg istraživanja utjecaja anizotropije (vlaknaste strukture drva) u 3D-model KE.

LITERATURA

- [1] Epple, A.: Untersuchungen über Einflüsse auf die Spannungsverteilung in aufgeleimten Holzlashen und holzernen Knotenplatten, Dissertation, Univ. Hamburg, 1983.
- [2] Hranj, D.: Ispitivanje lijepljenog uglovnog spoja grede i stupova lameliranih okvira, diplomski rad, FGZ, Zagreb 1988.
- [3] Kosmalski, S.: Klebeverbindungen von Aluminiumblechen, Bauingenieur 63 (1988), str. 57—61.
- [4] Zarić, B., Tošić, N.: Kruti uglovi okvirnih nosača računatih prema teoriji plastičnosti, ref. T-88., VIII. kongres SDGKJ, 1987, str. 229—232.
- [5] Žagar, Z.: Montažni spoj veze ugla lameliranih drvenih okvira. Drvna industrija, 39 (1988), 7—8, str. 159—165.
- [6] Žagar, Z.: Kompjutorsko proračunavanje konstrukcija ICES STRUDLom I, II, III. i IV. dio. FGZ/DGITZ Zagreb, 1988.
- [7] Žagar, Z., Baljkas, B., Haiman, M., Magerle, M.: Numerički model drvenih konstrukcija, 2. simpozij »Savremene drvene konstrukcije«, Bled, 1986, 121—143.
- [8] Žagar, Z.: Drvene konstrukcije u nas, 7. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 1985, 29—44.
- [9] Žagar, Z.: Neki primjeri primjene računara pri projektiranju (CAD/CAM), stručni seminar, 1988, Zbornik radova, DGITNS Novi Sad 1988, 128—180.
- [10] Žagar, Z.: Kompjutorsko proračunavanje konstrukcija s IBM ICES STRUDLom, I, II, III, IV, V. dio. GI/FGZ/DGKH, 1988 (predano u tisak)

Recenzenti: prof. N. Lovrić, mr S. Petrović