

Drvene konstrukcije bez adheziva i metalnih spajala

Bruno Zadravec¹, prof. dr. sc. **Vlatka Rajčić²**

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, bruno.zadravec@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, vlatka.rajcic@grad.unizg.hr

Sažetak

U građevinskoj industriji od rastuće je važnosti provođenje održive gradnje i principa 3R, što drvene konstrukcije u potpunosti omogućavaju. Kako bi se elementi nosive konstrukcije mogli što bolje prilagoditi principu 3R, minimizira se uporaba adheziva na naftnoj bazi i čeličnih spojnih sredstava. Jedno od alternativnih rješenja takvih sustava je povezivanje elemenata drvenim trnovima ili tesarskim spojevima. Nosivost elemenata spojenih drvenim trnovima uvjetovana je njihovim brojem i razmakom, kao i usmjerenjem u odnosu na vlakna. Trnovi mogu biti i zavareni pomoću visoke brzine rotacije svrdla pri ugradnji. Zavarenim trnovima postiže se veća nosivost nego tijesno ugrađenim.

Ključne riječi: drvo; 3R – reduce,reuse,recycle; spojevi; zavareni trnovi; trnovima lamelirano drvo (Dowel laminated timber -DLT); održivost

Timber structures without adhesives and metal connectors

Abstract

In the construction industry, the implementation of sustainable building practices and the 3R principles is becoming increasingly important, and timber structures fully support these approaches. To better align load-bearing structural elements with the 3R principles, use of petroleum-based adhesives and steel fasteners is minimized. One alternative solution for such systems is the connection of elements using wooden dowels or traditional carpentry joints. The load-bearing capacity of elements connected with wooden dowels depends on their number and spacing, as well as their orientation relative to the wood grain. Dowels can also be welded using high drill rotation speed during installation. Welded dowels achieve higher load-bearing capacity than tightly fitted ones.

Key words: timber; 3R – reduce,reuse,recycle; Joints; Welded dowels; Dowel laminated timber (DLT); sustainability

1 Uvod

Građevinski sektor odgovoran je za znatnu količinu proizvedenog otpada i emisije štetnih plinova svake godine. Provedena istraživanja [1] navode da je 40% ukupne potrošene energije i otpada proizvedenog u Europi proizašlo iz građevinske industrije. Posljedično navedenom, u građevinarstvu se javljaju razne inicijative usmjerene prema ekološki prihvatljivoj gradnji uz uporabu održivih materijala. Drvo kao građevni materijal najpovoljniji je za implementaciju 3R inicijative. Smanjenje, recikliranje i ponovna uporaba (3R) također djeluju ekonomski povoljno jer se uporaba elemenata po isteku vijeka trajanja može promijeniti te se samim time smanjuje količina potrebnog materijala. Osim navedenog, drvena građa ima znatno manji ekološki otisak. Istraživanje [2] usporedilo je proizvodnju 3 metara visokog stupa izvedenog od drva, čelika, betona i opeke. Drvo ima najmanji utrošak materijala, a potrošena energija je tri puta manja za drvo u odnosu na armirano betonski stup te devet puta manja u odnosu na čelični stup. Mogućnost recikliranja klasičnih drvenih konstruktivnih elemenata ograničena je uporabom adheziva na naftnoj bazi i uporabom čeličnih spojnih sredstava. Potpuno drvena rješenja istražuju se već određeno vrijeme, kako je prikazano u istraživanju [3]. Osnovni način povezivanja potpuno drvenih konstrukcija je uz pomoć drvenih trnova i tesarskih spojeva. Nosivost spojeva trnovima ovisi o tipu i promjeru trna, njihovom razmaku i kutu ugradnje. Danas u građevinskoj industriji već postoje komercijalizirani elementi tog tipa. Iako su DLT (dowel laminated timber) elementi već niz godina na tržištu te su provedena brojna istraživanja, sam sustav je još u fazi razvoja i optimizacije. To je jasno prikazano u istraživanju [2] gdje su uspoređene cijene iz više europskih zemalja vezano za drvene plošne elemente sastavljene sa više tipova spojnih sredstva. DLT sustavi skuplji su do 35% od klasičnih CLT elemenata. Uspoređeni su također različiti tipovi DLT sustava, koji se primarno razlikuju u smjeru ugradnje trnova. Iako je mogućnost recikliranja veća, takvi sustavi ostvaruju manju nosivost za veću cijenu što ih čini neprivlačnim za uporabu. Daljnji proces mehanizacije i ispitivanja provedena na tim sustavima znatno će doprinijeti njihovoj uporabi u industriji. Osim klasične ugradnje utiskivanjem, trnovi mogu biti i zavareni. Takvi trnovi pokazuju bolja mehanička svojstva [4]. U sklopu samog istraživanja biti će provedeno ispitivanje čvrstoće drvene građe na pritisak po omotaču rupe. U Eurokodu 5 [5] ne postoje proračuni za drvene elemente povezane drvenim trnovima. Rezultati dobiveni eksperimentalno biti će uspoređeni sa analitičkim vrijednostima dobivenim iz Eurokoda 5 (Formula 8.31) za spojeve sa metalnim štapastim spajalima.

Eksperimentalno dobivena vrijednost pritiska po omotaču rupe koristit će se u izradi analitičkih i numeričkih modela linijskih i plošnih ispitanih elemenata.

Cilj ovog djela istraživanja je predložiti korekcijske formule za pritisak po omotaču rupe koje su dane u Eurokodu 5 za čelične trnove. Također, ovo je jedna od kritič-

nih provjera kod izrade DLT elemenata i određivanje razlike između eksperimentalno dobivenih i analitičkih vrijednosti eliminirat će odstupanja pri određivanju nosivosti kompozitnih nosača koji će biti ispitani. Osim detalja, ispitat će se linijski i plošni elementi. Elementi se razlikuju po količini, usmjerenju i promjeru trnova koji ih povezuju. Plošni elementi biti će ispitani na vertikalna i horizontalna djelovanja. Nastavno na laboratorijska ispitivanja proračunat će se numerički modeli koji mogu precizno odrediti svojstva nosivosti i uporabivosti ovisno o spojnim sredstvima.

DLT elementi mogu naći svoju primjenu u stambenim i poslovnim objektima manjih do srednjih raspona te rekonstrukciji i ojačanju postojećih konstrukcija. Pozitivan aspekt velike nosivosti drva u odnosu na masu čini ga izuzetno povoljnim za sanacije i ojačanja u potresno aktivnim područjima.

2 Densificirani trnovi

Nosivost trnova primarno je definirana kvalitetom drvene građe od koje su izrađeni. Svi trnovi su izrađeni od tvrdog drva klase D60 (bukva). Prije ispitivanja provedeni su kroz postupak densifikacije. Densifikacija je proces smanjenja poprečnog presjeka pod djelovanjem pritiska i visokim temperaturama. Takvi trnovi pokazuju čak i do 3.5 puta veću nosivost u odnosu na klasične trnove od tvrdog drva na posmik okomito na smjer vlakanca [6]. Također, densificirani trnovi pokazuju znatno bolju duktilnost u odnosu na trnove tvrdog drva, gotovo kao čelični [6], što je povoljno jer će pretpostavljeni oblici loma za čelične spojeve biti vrlo slični lomu densificiranih trnova.

Takvi trnovi zbog procesa densifikacije u spoj ulaze manje relativne vlažnosti nego drveni elementi koje povezuju. To dovodi do povećanja razine vlage i dimenzija, čime se ostvaruje još bolja veza između elementa i spojnog sredstva. Važno je za napomenuti da takva interakcija spojnog sredstva sa okolnim elementima dovodi i do promjene mehaničkih svojstva samog trna što je potrebno uzeti u obzir kod proračuna i provoditi kontrole detalja za vrijeme vijeka trajanja građevine.

Proračun nosivosti veza ostvarenih štapastim spojnim sredstvima u Eurokodu 5 definiram je prema Johanssensu za spoj drvo-drvo pomoću metalnog spojnog sredstva. Jedan od ciljeva istraživanja je uz provjeru pritiska po omotaču rupe predložiti korekcijske formule za moment tečenja spojnog sredstva. Linijski elementi (grede i stupovi) biti će ispitani sa više različitih razmaka trnova te će se provoditi usporedba eksperimentalnih rezultata i rezultata dobivenih proračunski u kojima je koeficijent sprežanja proračunat prema Eurokodu 5 (formula B.5 – nacionalni dodatak B).

Usmjerenje trnova ima izuzetno veliki utjecaj na duktilnost i nosivost elemenata. Trnovi postavljeni okomito na element prenose isključivo posmična napreza-

nja, dok trnovi postavljeni pod kutom prenose posmična i uzdužna naprezanja. Uzdužna naprezanja mogu biti vlačna i tlačna, ovisno o poziciji trna. Potrebno je utvrditi koje je usmjerenje trnova optimalno po pitanju nosivosti te usporediti rezultate sa ostalim tipičnim nagibima u svrhu određivanja stupnja utjecaja položaja na nosivost. Istraživanja ovog tipa već postoje (npr. [4]) no rezultati su ograničeni i najčešće ispituju mehanički utisnute trnove jednog promjera. Eksperimentalno je dokazano da će trnovi ugrađeni okomito na element imati jednaku krutost no znatno manju silu loma u odnosu na trnove postavljene pod kutom od 45° .

2.1 Varenje trnova

Ispitivani uzorci biti će podijeljeni u dvije skupine po načinu ugradnje trnova. Zavarivanje trnova ugradnjom pri velikoj brzini rotacije pokazalo se da stvara spojeve znatne čvrstoće ([7], [8]). Pri ugradnji zbog utjecaja trenja generira se toplina koja otapa lignin u drvenoj građi. Posljedica tog utjecaja je bolja povezanost samog spoja ([4], [7]). Takvi spojevi ne koriste dodatne adhezive. Istraživanje [4] izvršilo je ispitivanja na linijskim elementima opterećenim na savijanje u kojima su lamele povezane zavarenim trnovima, trnovima povezanim adhezivima (PVA), čavlima te klasične lamele povezane adhezivima. Rezultati pokazuju da nosivost drvenih trnova promjera 10 mm daje jednako dobru, ako ne i bolju nosivost od spojeva čavlima standardnih dimenzija 3,1x70 mm. Također, eksperimentalno je dobiveno da je krutost spojeva trnovima duplo veća od krutosti spojeva čavlima. Zavareni trnovi imaju manju nosivost nego trnovi povezani adhezivima (PVA). Nosivost i krutost sustava zavarenih trnova znatno ovisi o kutu ugradnje trna. Rezultati su ograničeni na trnove promjera 10 mm te sa samo jednim razmakom. Konkurentnost trnova može se postići optimizacijom samog rasporeda i promjera kako bi se osigurala veća nosivost i krutost.

3 Čvrstoća pritiska po omotaču rupe

Ispitivanje čvrstoće pritiska po omotaču rupe provodit će se prema normi HRN EN 383:2007. Ispitivat će se trnovi različitih promjera. Pritisak po omotaču rupe mjeriti će se pod kutovima 0° , 45° i 90° u odnosu na smjer vlakna.

Trenutno su ispitani trnovi promjera 10 i 12 mm i dobivene su prosječne krivulje sila-pomak. Za provedena istraživanja analizirani su rezultati (Tablica 1.). U rezultatima je vidljivo odstupanje proračunskih od eksperimentalnih vrijednosti maksimalno 16%. Iako je podudaranje rezultata relativno dobro, u trnovima promjera 10 mm eksperimentalni rezultati dali su manju nosivost nego što je dobiveno proračunski. Potrebno je uvažiti da je trenutno ispitano samo 7 uzoraka svake serije te da rezultati znatno variraju. Također, pri mjerenju gustoće ispitanih ele-

menata zamijećena je oscilacija u gustoći između uzoraka iste skupine do 20%, kako je prikazano u tablici 2 i 3. Sa povećanjem kuta djelovanja nosivost elementa sa trnovima promjera 10 mm pada gotovo linearno. Na nosivost trnova promjera 12 mm također znatno utječe promjena gustoće pojedine skupine.

Prije prijedloga korekcije formula iz Eurokoda 5 potrebno je povećati broj uzoraka kako bi se dobile preciznije vrijednosti sa manjim utjecajem oscilacija.

Tablica 1. Usporedba eksperimentalnih i proračunskih vrijednosti čvrstoće pritiska po omotaču rupe

UZORAK	EKSPERIMENTALNO DOBIVEN PRITISAK PO OMOTAČU RUPE [N/mm ²]	ANALITIČKI DOBIVEN PRORAČUNSKI PRITISAK PO OMOTAČU RUPE [N/mm ²]
Ø10 - nagib trna 0°	23.62	20.44
Ø10 - nagib trna 45°	21.37	23.99
Ø10 - nagib trna 90°	19.33	22.01
Ø12 - nagib trna 0°	19.46	18.24
Ø12 - nagib trna 45°	20.88	19.10
Ø12 - nagib trna 90°	17.58	17.73

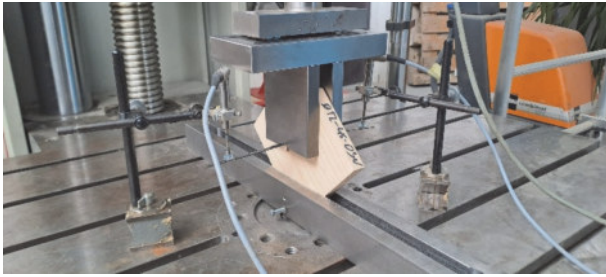
Tablica 2. Gustoća ispitanih uzoraka sa trnovima Ø10

MASA UZORKA (g)	Ø10-0	Ø10-0-V	Ø10-45	Ø10-45-V	Ø10-90	Ø10-90-V
UZORAK 1	77	77	118	143	262	254
UZORAK 2	86	87	124	145	258	249
UZORAK 3	76	86	116	147	263	253
UZORAK 4	77	88	124	144	262	282
UZORAK 5	86	86	118	144	246	267
UZORAK 6	74	88	124	149	257	261
PROSJEČNA MASA (g)	79.33	85.33	120.67	145.33	258.00	261.00
MAX DIMENZIJE (cm)	14x9.5x1.5	14x9.5x1.5	19.5x13.5x1.5	19.5x13.5x1.5	40x10x1.5	40x10x1.5
VOLUMEN ELEMENTA (m ³)	0.0001995	0.0001995	0.000258188	0.000258188	0.0006	0.0006
VOLUMEN RUPE (m ³)	1.178E-06	1.178E-06	1.1775E-06	1.1775E-06	1.178E-06	≤1.178E-06
UKUPNI VOLUMEN (m ³)	0.0001983	0.0001983	0.00025701	0.00025701	0.0005988	0.0005988
GUSTOĆA (kg/m ³)	400.02	430.28	469.50	565.48	430.85	435.86

Tablica 3. Gustoća ispitanih uzoraka sa trnovima Ø12

MASA UZORKA (g)	Ø12-0	Ø12-0-V	Ø12-45	Ø12-45-V	Ø12-90	Ø12-90-V
UZORAK 1	140	121	197	189	309	425
UZORAK 2	121	122	193	193	357	397
UZORAK 3	124	122	189	199	372	384
UZORAK 4	111	125	191	189	312	388
UZORAK 5	120	124	191	197	319	376
UZORAK 6	125	120	189	191	372	336
PROSJEČNA MASA (g)	123.50	122.33	191.67	193.00	340.17	384.33
MAX DIMENZIJE (cm)	17x10x2	17x10x2	23.5x16.5x2	23.5x16.5x3	48x10x2	48x10x2
VOLUMEN ELEMENTA (m ³)	0.00034	0.00034	0.000503	0.000503	0.00096	0.00096
VOLUMEN RUPE (m ³)	1.696E-06	1.696E-06	1.6956E-06	1.6956E-06	1.696E-06	1.696E-06
UKUPNI VOLUMEN (m ³)	0.0003383	0.0003383	0.000501304	0.000501304	0.0009583	0.0009583
GUSTOĆA (kg/m ³)	365.06	361.61	382.34	385.00	354.97	401.06

**Slika 1. Smjer djelovanja sile 90°****Slika 2. Smjer djelovanja sile 0°**



Slika 3. Smjer djelovanja sile 45°

4 Linijski i plošni elementi

Linijски i plošni DLT elementi već se koriste u građevinskoj industriji [2]. Sustav je i dalje u fazi razvoja, te se daljnjom optimizacijom pozicije, promjera i usmjerenja trnova može poboljšati konkurentnost što bi imalo izuzetno dobre posljedice na ekološki aspekt građevinarstva. Plošni elementi biti će ispitani na vertikalno opterećenje (ploče) te kombinaciju vertikalnog i horizontalnog opterećenja (zidovi). Usmjerenje lamela, kao i kod CLT elemenata određuje smjer glavne nosivosti. Uzorci će biti podijeljeni na sustave sa slojevima u smjeru i okomito na smjer sila i sustave sa lamelama postavljenim pod kutom od 45° u odnosu na smjer primarnog opterećenja.

U istraživanju [3] uspoređeni su rezultati iz više izvora u kojima su ispitani i uspoređeni linijski elementi sastavljeni od lamela na savijanje u tri točke. Rezultati provedenih istraživanja su uniformni. Nosivost DLT elemenata znatno varira ovisno o položaju trnova te vrsti ugradnje (mehanička, varenje). Iako postižu bolju krutost i nosivost u odnosu na lamele povezane čavlima, uporaba adheziva i dalje daje najbolje rezultate.

Pregledom istraživanja vidljivo je da razmak i promjer trnova nisu uzeti u obzir već se u istraživanjima koriste kao fiksna varijabla. Navedeni parametri direktno utječu na koeficijent sprežanja lamela takvog nosača i posljedično na samu krutost i nosivost. Cilj ispitivanja linijskih elemenata je testirati veliki broj uzoraka u kojima variraju parametri: usmjerenje, promjer, razmak i tip ugradnje trnova. Pomoću prikupljenih podataka izvesti će se numerički model kojim se mogu precizno definirati veze između lamela i tako dobiti ponašanje elemenata ovisno o navedenim varijablama.

Do sada su ispitani uzorci iz 4 serije koji koriste trnove promjera 10 mm sa uniformnim razmakom na gredama duljine 2,2m. Kako bi se omogućila preliminarne usporedbe nosivosti različitih tipova ugradnje, 2 serije su izvedene tako da svaki trn povezuje samo po dvije lamele, mehanički i varom. Zadnje dvije serije sastoje se od grede sa trnovima ugrađenim okomito na element kroz cijelu duljinu i sa

trnovima ugrađenim pod kutom od 45° . Svi elementi ispitani su na savijanje u četiri točke. Uspoređene su vrijednosti krutosti i nosivosti za srednje vrijednosti od svake serije (Tablica 2). U budućim istraživanjima predviđa se ispitivanje lameliranih nosača kvalitete građe GL24h istog presjeka kako bi se mogle usporediti vrijednosti nosivosti i krutosti DLT elemenata u odnosu na sustave sa potpunim sprežanjem lamela.

Tablica 4. Usporedba krutosti i nosivosti greda ispitanih na savijanje u četiri točke

UZORAK	KRUTOST [N/mm]	NOSIVOST [kN]
TRNOVI UNESENI POD KUTOM OD 90°	93,30	14,38
TRNOVI UNESENI POD KUTOM OD 45°	99,08	16,21
VERTIKALNI TRNOVI POVEZUJU PO DVIJE LAMELE, MEHANIČKI UGRAĐENI	91,28	13,22
VERTIKALNI TRNOVI POVEZUJU PO DVIJE LAMELE, ZAVARENI	94,02	13,31



Slika 4. Linijski element neposredno prije otkazivanja



Slika 5. Otkaz linijskog elementa u donjoj zoni

Rezultati dobiveni ispitivanjem za mehaničko ugrađene trnove u skladu su sa pretpostavljenim rezultatima na temelju do sada provedenih ispitivanja. Trnove ugrađene pod kutom od 45° pokazuju veću krutost i nosivost u odnosu na trnove ugrađene pod kutom od 90° . Zavareni trnove pokazuju zanemarivo bolja svojstva

od onih mehanički ugrađenih. Važno je naglasiti da je svaka serija imala po 5 uzoraka za ispitivanje. Također, trnovi promjera 10 mm spadaju u trnove manjih promjera te gubitak djela poprečnog presjeka pri varenju ima veći utjecaj na nosivost trna i kvalitetu veze nego kod trnova većeg promjera.

5 Zaključak

Potpuno drveni konstrukcijski sustavi, bez uporabe adheziva i metalnih spajala, predstavljaju jedinstveno rješenje za održivu gradnju. U kontekstu 3R inicijative u građevinarstvu, drvo se ističe kao najsvrsishodniji i najprikladniji materijal. Zamjena adheziva i metalnih spajala u konstrukcijskim detaljima korištenjem isključivo drvenih spojnih sredstava dodatno povećava potencijal za recikliranje i ponovnu upotrebu elemenata. Trenutno je korištene takvih elemenata u građevinskoj industriji ograničeno visokom cijenom proizvodnje i manjom nosivosti. Provođenjem daljnjih istraživanja i korekcijom osnovnih parametara, DLT elementi mogu postati konkurentno rješenje za građevine manjih do srednjih raspona. Potpuno upetu vezu između lamela, kakvu dobijemo uporabom adheziva na naftnoj bazi, nije moguće dobiti uporabom trnova. No, optimizacijom parametara koji će se testirati u ovom radu smatra se da se može postići nosivost i krutost sustava prihvatljive veličine. Također, zbog nedostatka informacija cijena proizvodnje je viša jer ne postoje pogoni koji su specijalizirani za taj tip proizvodnje. Područje je u razvoju, i postoji mnogo prostora za napredovanje. Prikupljanjem dovoljno velike baze podataka o ponašanju takvih sustava, moguće je predložiti korekcijske formule koje bi se mogle koristiti u analitičkim proračunima. Rezultati trenutno provedenih ispitivanja ograničeni su brojem ispitanih uzoraka te su u skladu sa rezultatima istraživanja nađenih pri pregledu stanja područja. Smatra se da trnovi promjera 10 mm nisu pogodni za ugradnju pomoću vara zbog gubitka poprečnog presjeka koji se sprži. Mehanizacija kojom su se proizvodili zavareni detalji za ispitivanja provedena do sada bila je ograničena za uporabu trnova većih promjera. U daljnjim istraživanjima potrebno je povećati promjere trnova kako bi se dobili mjerodavniji rezultati.

Literatura

- [1] Gluch, P. : Environmental Survey for the construction and real estate sector: a survey of the sector's environmental work: CMB 2007 report, http://www.cmb-chalmers.se/publikationer/miljobarometern_2006.pdf
- [2] Buck, D., Wang, X.(A.), Hagman, O., Gustafsson, A.: Comparison of Different Assembling Techniques Regarding Cost, Durability, and Ecology - A Survey of Multi-layer Wooden Panel Assembly Load-Bearing Construction Elements, *BioResources* 10(4)(2015), pp. 8378-8396.

- [3] Sotayo, A., Bradley, D., Bather, M., Sareh, P., Oudjene, M., El-Houjeiry, I., Harte, A. M., Mehra, S., O'Ceallaigh, C., Haller, P., Namari, S., Makradi, A., Belouettar, S., Bouhala, L., Deneufbourg, F., Guan, Z.: Review of State of the Art Dowel Laminated Timber Members and Densified Wood Materials as Sustainable Engineered Wood Products for Construction and Building Applications, *Developments in the Built Environment* Volume 1(2020), 100004
- [4] Bocquet, J.F., Pizzi, A., Despres, A., Mansouri, H.R., Resch, L., Michel, D., Letort, F.: Wood joints and laminated wood beams assembled by mechanically-welded wood dowels, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 21:3-4 (2007). pp. 301-317.
- [5] Eurokod 5: Projektiranje drvenih konstrukcija – Dio 1-1: Općenito – Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1995-1-1:2004+AC:2006+A1:2008) (2013)
- [6] Jung, K., Kitamori, A., Komatsu, K.: Evaluation on structural performance of compressed wood as shear dowel, *Holzforschung* 62(4) (2008), pp. 461-467.
- [7] Pizzi, A., Leban, J.-M., Kanazawa, F., Properzi, M., Pichelin, F.: Wood dowel bonding by high-speed rotation welding, *Journal of Adhesion Science and Technology* (2012), pp. 1263-1278.
- [8] Leban, J. M., Pizzi, A., Properzi, M., Pichelin, F., Gelhaye, P., Rose, C.: Wood welding: A challenging alternative to conventional wood gluing, *Scandinavian Journal of Forest Research* 20(6) (2005), pp. 534-538.