

UDK 624.011.1:674-419

## PROBLEMATIKA PRORAČUNA SAVIJENE GREDE OD LEPLJENOG LAMELIRANOG DRVETA SA OTVORIMA

Dragoslav Stojić<sup>1</sup>, Radovan Cvetković<sup>2</sup>, Stefan Conić<sup>3</sup>

**Rezime:** U savremenom građevinarstvu lepljene lamelirane konstrukcije (LLD) predstavljaju efiksna, jednostavna i brzo izvodljiva rešenja pojedinih delova objekata ili objekta u celini. U mnogim praktičnim rešenjima neophodno je ostaviti otvore u nosačima ili ih u fazi montaže izbušiti na licu mesta. Otvori (rupe) u svim nosećim konstrukcijskim elementima bez obzira na veličinu i geometriju, predstavljaju slaba mesta a u nekim slučajevima i kritične zone usled koncentracije napona na periferiji otvora. U zavisnosti od veličine i lokacije otvora na nosaču, potrebno je posebno proveriti nosivost ovakvog elementa. Kod lepljenih lameliranih konstrukcija (LLD) zone oko otvora (rupa) mogu biti uzuzetno kritične, iz razloga koncentrisanja napona zatezanja upravno na vlakna drveta a samim tim i pojava pukotina i prslina što dovodi do gubitka integriteta nosača. U radu su analizirani najpoznatiji Pravilnici za drvene kostrukcije, koji tretiraju pomenutu problematiku i daju uputstva za analizu takvih nosača.

**Ključne reči:** lepljeno lamelirano drvo, otvor, EC5, DIN 1052.

## ANALYSIS OF BENT WOODEN BEAMS WITH HOLES

**Abstract:** In modern construction glued laminated structures (GLULAM) represent a more efficient, simple and fast feasible solutions for certain parts of buildings or for the whole building. In many practical solutions it is necessary to leave the holes in the beams or, in assembly stage, drill on the spot. Holes in all the structural elements regardless of the size and geometry, are the weak points, in some cases the critical zone due to stress concentration at the periphery of the holes. Depending on the size and location of the hole, it is necessary to check the capacity of such particular elements. In case of glued laminated structures zone around the holes can be extremely critical, because of concentration tensile stress perpendicular to the wood fibers and thus cracks which leads to loss of integrity of the beam. This paper analyzes some of codes and regulations for wooden constructions, which treat the above mentioned issues and provide guidance for the analysis of such beams.

**Keywords:** glulam, hole, EC5, DIN 1052.

<sup>1</sup> Dr, redovni prof., Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, ul. Aleksandra Medvedeva 14, Niš, Srbija

<sup>2</sup> Mr, asistent, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, ul. Aleksandra Medvedeva 14, Niš, Srbija

<sup>3</sup> Master građ.inž., student doktorskih akademskih studija, Stipendista Ministarstva, saradnik u nastavi, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, ul. Aleksandra Medvedeva 14, Niš, Srbija

## 1 UVOD

Posmatranjem istorijskih objekata, kao i analizom arheoloških ostataka, može se lako zaključiti da je drvo jedan od najstarijih građevinskih materijala, pored kamena i primitivnih vrsta opeka. Uprkos primitivnim spojnim sredstvima, načina obrade materijala, poznavanju karakteristika materijala, još u starom veku su izvedene konstrukcije znatnih dimenzija i raspona. U tradicionalnom građenju drvetom najveći napredak dostignut je u XVI i XVII veku, dok se za savremeno građenje drvetom vezuje druga polovina XX veka odnosno sa razvojem savremenih spojnih sredstava, kako mehaničkih tako i adhezivnih, primenom kompozitnih i spregnutih materijala na bazi drveta i savremenom tehnologijom drveta [1].

Drvo predstavlja organski i prirodni materijal i njega odlikuju u anatomskom smislu nehomogenost građe, a u mehaničkom smislu je veoma izražena anizotropija, odnosno različito ponašanje materijala u različitim pravcima naprezanja kao i različito ponašanje u zavisnosti od naponskog stanja [1], [2], [3]. S obzirom da nastaje prirodnim procesima, drvo u svojoj strukturi i anatomiji može imati i nedostatke koji se najčešće ogledaju u čvorovima, smolnim kanalima, prslinama, nepravilnosti godova i td. U građevinarstvu se najčešće od četinara koristi jela, smreka, bor i ariš dok se od tvrdih lišćara koriste hrast i bukva. Ostale vrste drveta se retko koriste na našim prostorima ali se mogu veoma efikasno koristiti za konstrukcije skela i privremenih objekata. Lameliranje, odnosno rezanje debla po dužini na tanke lamele (daske) debljine do 30mm predstavlja veoma efikasan način uklanjanja svih navedenih nedostataka i grešaka u drvetu jer se svi nedostaci uočavaju i eliminiraju iz nosača, za razliku od monolitnog drveta tj. klasične drvene građe, gde se veoma teško mogu uočiti unutrašnje nepravilnosti u strukturi drveta. Ovakav materijal na bazi drveta našao je veliku primenu u građevinarstvu s obzirom na izuzetno povoljne karakteristike kao što su: mala zapreminska masa, velika čvrstoća paralelno vlaknima, mala osetljivost na temperaturne promene i razlike kao i na hemijski agresivne sredine i td.

Pod pojmom lepljene lamelirane konstrukcije smatraju se nosači ili elementi koji nastaju posebnim tehnološkim postupcima u strogo kontrolisanim uslovima fabričkih pogona, lepljenjem lamela (dasaka) određenih debljina pod izuzetno velikim pritiscima uz upotrebu specijalnih vodootpornih

sintetičkih lepkova na bazi formaldehida. Ovakvim tehnološkim postupkom dobija se građevinski materijal sa ujednačenim karakteristikama, a samim tim moguća su i veća naprezanja nosača. Nosači od LLD našli su veliku primenu u visokogradnji i niskogradnji, kod krovova malih i velikih raspona, za izradu montažnih objekata stalnog ili privremenog karaktera, pešačkih ili drumskih mostova i td. Veoma jednostavna i laka montaža nosača uz korišćenje lake mehanizacije, neograničenost u pogledu dužina elemenata, proizvoljnost oblika nosača kao i poprečnog preseka samo su neke od prednosti ovakvih vrsta elemenata. U savremenim konstrukcijama se sve češće koriste i spregnute konstrukcije na bazi drveta, čelika i betona gde se različiti materijali sprežu i nedostaci jednog od materijala, kompenzuju dobrim karakteristikama drugih materijala na taj način stvarivši novi kompozitni materijal.

Prilikom projektovanja i izvođenja konstrukcija od LLD veoma često se kao zahtev nameće uslov bušenja nosača, odnosno ostavljanja otvora u elementima iz različitih estetskih, arhitektonskih i konstruktivnih razloga. Otvori u krovnim gredama, kao i u stubovima projektuju se za prolaz različitih instalacija (cevi, kablova...), kao i zbog olakšane montaže samog elementa i td. (slika 1).



*Slika 1 - Primer krovne grede sa kružnim otvorima za prolaz instalacija [6]*

Rupe i otvori na nosačima od LLD, u zavisnosti od geometrije, veličine i pozicije na nosaču, mogu predstavljati veoma kritične zone, tj. mesta u kojima dolazi do drugačije preraspodele napona u odnosu na ostale delove nosača. Iz svih navedenih razloga, ova problematika je u prethodnom periodu dosta proučavana, tako da pojedini pravilnici za proračun drvenih konstrukcija daju neke osnovne preporuke koje se pre svega odnose na veličine otvora i najpovoljnije lokacije na nosačima u zavisnosti od naponskog stanja. Osnovna saznanja vezana za ovu problematiku utemeljena su još u prvoj polovini XX

veka, dok su savremena ispitivanja vršili Halstrom, 1995., Hofflin, 2005., Aicher and Hofflin, 2006., i mnogi drugi. U svim standardima i propisima se uvek naglašava da je neophodno analizirati i proveriti svaki slučaj ponaosob, upravo zbog svih tih različitih fenomena koji se mogu javiti kao i zbog specifičnosti problema, naročito u drvenim konstrukcijama za razliku od ostalih građevinskih materijala, gde rupe i otvori u nosačima ne predstavljaju neke velike probleme. U propisima i standardima su date kritične zone i lokacije za otvore i rupe na grednim nosačima u zavisnosti od spoljašnjeg opterećenja tj. naponskog stanja.

## 2 OTVORI U GREDAMA PREMA RAZLIČITIM PROPISIMA

Otvori u gredama opterećenim na savijanje predmet su izučavanja mnogih evropskih ispitivanja i projekata a sve u cilju dobijanja što realnijih rezultata i smernica prilikom projektovanja odnosno analize napona i deformacija. Neki od najznačajnijih pravilnika i kodova koji posebno tretiraju pomenutu problematiku jesu: Evrokod 5, DIN 1052, SIA 265 kao i mnogi drugi koji se pozivaju na već pomenute standarde. Na osnovu detaljne analize datih pravilnika za drvene konstrukcije, može se zaključiti da pravila i preporuke dosta variraju, s obzirom da su neka zasnovana na empirijskim relacijama, dok su druga izvedena iz numeričkih i eksperimentalnih rezultata.

### 2.1. Nemački pravilnik – DIN 1052 (DIN 1052:2004-08)

Prema pravilniku DIN 1052 [4] posebna pažnja se mora posvetiti gredama sa prodorima, odnosno otvorima. Pravilnik razmatra otvore veće od 50mm, dok za otvore manje od 50mm preporučuje proračun sa redukovanim poprečnim presekom (neto poprečni presek). Otvori i rupe na neojačanim delovima greda treba rasporediti prema sledećim pravilima: Rastojanje od ivice otvora do kraja grede ne sme biti manje od visine grede  $h$ , ukoliko na istoj gredi postoje dva otvora, minimalno rastojanje između njih treba biti najmanje kao visina grede  $h$ , ali ne manje od 300mm. Dužina otvora ili rupe  $a$  treba biti manja ili jednaka visini grede  $h$ , a visina grede  $b$  ili prečnik  $\emptyset$  ne treba biti veći od 40% ukupne visine grede  $h$ . Uglovi kod kvadratastih i pravougaonih otvora treba zaobliti sa minimalnim prečnikom  $r \geq 15\text{mm}$ . Rastojanje ivice kružnog otvora do centra oslonca treba biti veće ili jednako polovini visine grede  $h$ .

Otvori i rupe koji ispunjavaju navedene uslove se mogu koristiti u klasama 1 i 2, dok se za klasu 3 (*service class*) one moraju posebno ojačavati.

Za gredu od LLD koja ispunjava sve navedene uslove, sledeći uslovi moraju biti ispunjeni:

$$\frac{F_{t,90,d}}{0,5 \cdot l_{t,90,d} \cdot b \cdot f_{t,90,d}} \leq 1 \quad (1)$$

za pravougaone otvore :  $l_{t,90} = 0,5(h_d + h)$

za kružne otvore:  $l_{t,90} = 0,353h_d + 0,5h$

Dopuštena sila zatezanja upravno na vlakna  $F_{t,90,d}$  je definisana iz doprinosa transverzalne sile  $V_d$  i momenta savijanja  $M_d$ . Treba kontrolisati kritične preseke 1-1 i 2-2 prema slici 2.

$$F_{t,90,d} = F_{t,V,d} + F_{t,M,d} \quad (2)$$

$$F_{t,V,d} = \frac{V_d \cdot h_d}{4h} \cdot \left[ 3 - \frac{h_d^2}{h^2} \right] \quad (3)$$

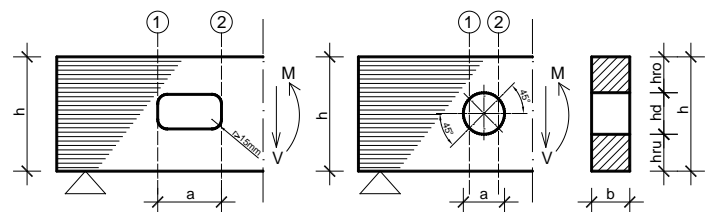
gde je  $V_d$  proračunska vrednost transverzalne sile u kritičnim presecima 1-1 i 2-2 (slika 2).

$$F_{t,M,d} = 0,008 \frac{M_d}{h_r} \quad (4)$$

gde je  $M_d$  proračunska vrednost momenta savijanja u kritičnim presecima 1-1 i 2-2 (slika 2).

za pravougaone otvore :  $h_r = \min \left\{ \begin{array}{l} h_{ro} \\ h_{ru} \end{array} \right\}$

za kružne otvore:  $h_r = \min \left\{ \begin{array}{l} h_{ro} + 0,15h_d \\ h_{ru} + 0,15h_d \end{array} \right\}$



Slika 2 - Položaj kritičnih preseka otvora u gredama bez ojačanja prema DIN 1052:2004-08

## 2.2. Evropski pravilnik – EUROCODE 5 (EN 1995-1-1:2004)

Projektovanje i konstruisanje greda sa otvorima je prema Evrokodu 5 [5] analizirano u delu u kome su razmatrane grede sa redukovanim poprečnim presekom odnosno grede sa zakošenim ivicama kod oslonaca. U pravilniku se navodi da za LLD grede, kod kojih su vlakna približno paralelna sa dužinom nosača, potrebno je kontrolisati napon smicanja kod oslonaca sa efektivnom (redukovanom) visinom poprečnog preseka  $h_{ef}$ . S obzirom da se koristi analogija sa zakošenim ivicama nosača kod oslonaca, pretpostavlja se da su otvori postavljeni u zoni maksimalnih transverzalnih sila pa se efekti od momenata savijanja zanemaruju.

$$\tau_d = \frac{1,5 \cdot V}{b \cdot h_{ef}} \leq k_v \cdot f_{v,d} \quad (5)$$

gde je:  $V$  – transverzalna sila,

$h_{ef}$  - efektivna visina poprečnog preseka,

$b$  – širina grede

$k_v$  - redukcioni faktor koji zavisi od toga kako su orijentisane kosine (otvori) na gredi tj. za donje delove (slika 3.) je  $k_v^D = 1,0$ , a za gornje prema sledećim uputstvima ali uvek  $\leq 1$ .

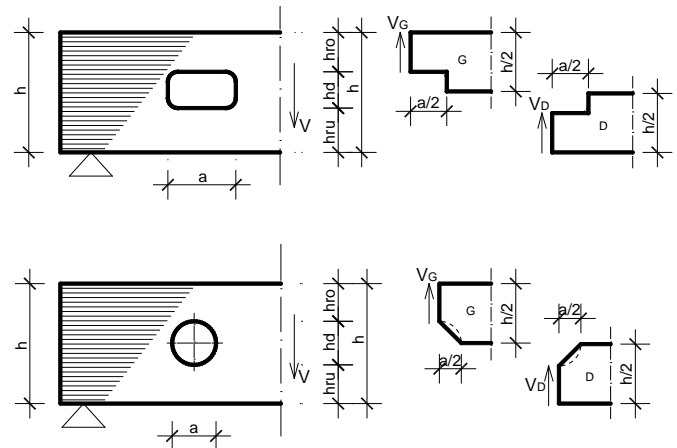
$$k_v^G = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ 6,5 \cdot \left( 1 + \frac{1,1 \cdot i^{1,5}}{\sqrt{h}} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{h} \cdot \left( \sqrt{\alpha(1-\alpha)} + 0,8 \cdot \frac{x}{h} \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2} \right)} \end{array} \right. \quad (6)$$

gde je:  $h = \frac{h}{2}$  - za otvore koji su centrično postavljeni po visini grede,

$$\left. \begin{array}{l} i = 0 \\ x = \frac{a}{2} \end{array} \right\} \text{ za pravougaone otvore}$$

$$\left. \begin{array}{l} i = 1 \\ x = 0 \end{array} \right\} \text{ za kružne otvore}$$

$$\alpha = \frac{h_{ef}}{h}$$



Slika 3 - Otvori bez ojačanja prema pravilniku EUROCODE 5 (EN 1995-1-1:2004)

Većina evropskih pravilnika za projektovanje drvenih konstrukcija se zasniva na pomenutim principima sa malim varijacijama u zavisnosti od usvojenih Nacionalnih dokumenata (NA). Američki institut za drvene konstrukcije, za razliku od evropskih, daje kritične zone na nosačima u zavisnosti od naponskog stanja, kao i maksimalni broj otvora sa određenim dimenzijama takođe, pored horizontalnih otvora u pravilniku se posebno tretiraju i vertikalne rupe.

S obzirom da veliki broj Pravilnika tretira isključivo otvore na nosačima koji su pravilnih geometrijskih oblika (kružni i pravougaoni), to za analizu nosača sa proizvoljnim oblicima otvora je neophodno koristiti softvere za analizu napona koji rade po određenim metodama teorije konstrukcija. Za analizu stanja napona i deformacija složenih konstrukcijskih sistema sa otvorima, u savremenom građevinarstvu se najčešće koriste programski paketi koji na efikasan način diskretizuju određene oblasti na nosaču i koji rade po metodi konačnih elemenata, dok se jednostavnije slučajeve mogu koristiti i različite aproksimacije i uprošćenja za dobijanje rezultata koji su više praktičnog nego teorijskog značaja.

## 3 ZAKLJUČAK

Analiza stanja napona i deformacija greda od LLD sa neojačanim kružnim otvorima predstavlja specifičan konstruktorski problem, koji se u literaturi veoma često zapostavljao u prošlosti. Na osnovu datih Pravilnika može se zaključiti da DIN 1052 daje preciznije preporuke za pravilno projektovanje rupa u gredama u odnosu na EC5 koji se oslanja na proračun

greda sa zakošenim ivicama kod oslonaca. Takođe treba napomenuti da se u standardima i propisima uvek naglašava da je neophodno analizirati i proveriti svaki slučaj ponaosob, upravo zbog svih tih različitih fenomena koji se mogu javiti kao i zbog specifičnosti problema, naročito u drvenim konstrukcijama. U savremenom građevinarstvu se veoma često javlja potreba za rupama koje su nepravilnog geometrijskog oblika pa se ovakvi i slični problemi najčešće analiziraju u savremenim softverima koji koriste metod konačnih elemenata gde se sve kritične zone mogu veoma efikasno uočiti i eliminisati pravilnim korekcijama. U svakom slučaju, koncentracije napona koje se javljaju na periferijama otvora kod drvenih greda mogu se svesti na najmanju moguću meru pravilnim konstrukcijskim oblikovanjem kao i posebnim ojačanjima što može biti oblast nekog novog istraživanja.

#### 4 LITERATURA

- [1] Stojić, D.: *Drvene konstrukcije i skele*, Univerzitet u Nišu, Građevinski fakultet Niš, 1996., Niš, str.1-2
- [2] Gojković, M; Stojić, D.: *Drvene konstrukcije*, Građevinski fakultet u Beogradu, 1996., Beograd, str.32-35
- [3] Muravljev, M; Stevanović, B.: *Zidane i drvene konstrukcije zgrada*, Građevinski fakultet u Beogradu, 1999., Beograd, str.118
- [4] DIN 1052:2004-08 – Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. (In German), Munchen, 2005.
- [5] Eurocode 5: *Design of timber structures – Part 1-1:General - Common rules and rules for buildings*. EN 1995-1-1:2004 (E).
- [6] Danielsson, H.: *The Strength of Glulam Beams with Holes, A Survey of Tests and Calculation Methods, Division of Structural Mechanics*, LTH, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden.
- [7] Aicher, S.; Hofflin, L.: *Fracture behavior and design of glulam beams with round holes*, 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, Japan, 25.6.2008.