

Prof. dr Boško STEVANOVIĆ, dipl. inž. građ.¹
Asist. mr Ivan GLIŠOVIĆ, dipl. inž. građ.¹
Asist. Miloš PETROVIĆ, dipl. inž. građ.¹

PRIMENA KARBONSKIH TRAKA ZA OJAČANJE DRVENIH NOSAČA

0352-2733, 45 (2012),p. 167-200

UDK: 624.011.1.046
IZVORNI NAUČNI ČLANAK

Rezime

U poslednjih desetak godina FRP kompoziti se intezivno koriste u kombinaciji sa armiranobetonskim i zidanim konstrukcijskim elementima. Odlične mehaničke karakteristike, mala sopstvena težina, izuzetna mnogostranost i jednostavnost čine kompozitne materijale podesebnim za primenu i u drvenim konstrukcijama. Ovim istraživanjem ispituju se mogućnosti primene karbonskih traka kao ojačanja drvenih nosača. Eksperimentalni program sproveden je sa ciljem utvrđivanja ponašanja pri savijanju lepljenih lameliranih drvenih nosača ojačanih karbonskim trakama. Rezultati ispitivanja pokazali su da postavljanje karbonskog ojačanja u zonu najvećih na-

¹ Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Rad primljen oktobra 2012.

pona zatezanja, sa donje strane nosača, može dovesti do povećanja nosivosti i krutosti, kao i duktilnosti.

Ključne reči: drvo, karbonska vlakna, ojačanje, nosači, ponašanje pri savijanju.

APPLICATION OF CFRP PLATES FOR STRENGTHENING OF TIMBER BEAMS

Summary

Fiber reinforced polymer (FRP) composites have largely been used in combination with concrete and masonry structural elements in last decade. The fiber's excellent mechanical properties, light weight, wide variety of available size and shapes, and easy installation procedure made these products appear very promising to apply in timber structure. This study investigated the possibility of using carbon FRP plates as reinforcement of timber beams. An experimental program based on a four-point bending test is proposed to characterize flexural response of CFRP-glulam beams. Experimental results showed that CFRP reinforcement positioned in the more highly stressed tension region at the bottom of the glulam beam may produce increases in strength and stiffness as well as ductility.

Key words: timber, carbon fiber, reinforcement, beams, bending behaviour.

1. UVOD

Drvo kao građevinski materijal primenjuje se od najstarijih vremena. I danas, pored progressa čelika i betona u savremenom građevinarstvu, drvene konstrukcije imaju svoje mesto u građenju najraznovrsnijih objekata. Mala zapreminska težina i relativno velika čvrstoća paralelno sa vlaknima, laka obrada, velike mogućnosti oblikovanja, jednostavna montaža, nedvosmislena eko-nomičnost i izuzetna toplina koju drvo kao materijal pruža su samo neki od parametara koji utiču na uspešnu primenu drvenih konstrukcija. Međutim, drvo ima i svoje nedostatke. Promenljivost svojstava nosivosti i krutosti, prouzrokovana prisustvom prirodnih defekata i varijacijama u uslovima rasta, umogome otežava predviđanje ponašanja drvenih elemenata pri različitim opterećenjima. Osim toga, različita oštećenja drvenih konstrukcija se mogu javiti kao posledica organske prirode drveta. Tipični uzroci degradacije drveta su: gljive, insekti, vlaga, temperaturne promene i prekomerna mehanička opterećenja.

Ojačanje drvenih elemenata pruža različite mogućnosti kako za postojeće konstrukcije, tako i za nove objekte. Efikasnim tehnikama mogu se sanirati oštećenja ili povećati nosivost postojećih drvenih konstrukcija, i na taj način uštedeti novac i materijal predviđen za zamenu konstrukcije. Takođe, primena ojačanja može dovesti do

smanjenja dimenzija drvenih elemenata i korišćenja drvene građe lošijeg kvaliteta, čime se omogućava efikasnija upotreba drvenih resursa.

Tradicionalne metode ojačanja i sanacije drvenih konstrukcija uglavnom su bazirane na primeni metalnih ojačanja (čelične ploče i šipke, aluminijumske ploče). Ovakve metode su jednostavne i efikasne, ali imaju određene nedostatke kao što su: povećanje sopstvene težine, teškoće pri transportu i izvođenju, troškovi održavanja i nekompatibilnost sa osnovnim materijalom. Konvencionalne metode generalno zahtevaju upotrebu mehaničkih spojnih sredstva (npr. zavrtnja i eksera) koja mogu biti neefikasna u oštećenom drvetu. Osim ovoga, čelični elementi su osetljivi na koroziju, a aluminiju-mske ploče se mogu izbočiti pri termičkim dejstvima [4].

Poslednjih desetak godina građevinski inženjeri su sve više upoznati sa prednostima koje nudi upotreba FRP materijala. Mada su obimna istraživanja sprovedena za ojačanje/sanaciju armiranobetonskih i zidanih elemenata, vrlo ograničene informacije su dostupne vezano za primenu u drvenim konstrukcijama. Najveća pažnja postojećih istraživanja usmerena je ka ojačanju drvenih nosača na savijanje [1, 3-5, 7-9, 13-15]. Ojačanje drvenih nosača na smicanje[6, 15, 16], kao i lokalno ojačanje na zatezanje upravno na vlakna su, takođe, predmet istraživanja [11].

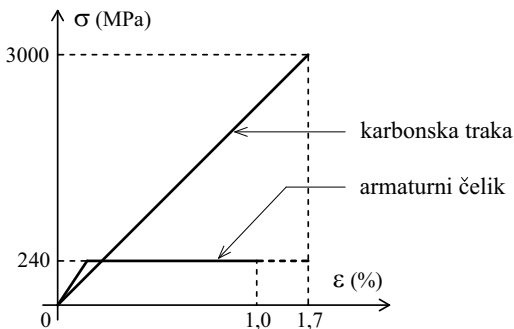
Glavni cilj ovog rada je da istraži ponašanje nosača od lepljenog lameliranog drveta ojačanih karbonskim trakama. Deset nosača ojačanih sa jednom karbonskom trakom zalepljenom sa spoljašnje strane preseka u zategnutoj zoni i pet kontrolnih neojačanih nosača ispitano je na savijanje do loma. Mehaničke karakteristike ojačanih nosača upoređene su sa karakteristikama neojačanih nosača sa aspekta veze opterećenje-ugib, oblika loma, nosivosti, krutosti i rasporeda dilatacija u preseku.

2. KARBONSKE TRAKE KAO OJAČANJE

FRP kompoziti su primarno razvijeni za potrebe avio i vojne industrije, ali se zbog povećane dostupnosti i niže cene njihova primena znatno proširila, uključujući i građevinarstvo. Danas se na području ojačanja i sanacije konstrukcija najčešće primenjuju takozvani CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) kompoziti u okviru kojih su prisutna karbonska (ugljenična) vlakna izraženih mehaničkih karakteristika [12]. To su gotovi fabrički proizvodi najčešće u obliku traka-laminata u okviru kojih su podužno orjentisana vlakna povezana izuzetno čvrstom, hemijski otpornom i trajnom sintetičkom smolom (kao matricom). Osnovna funkcija matrice je da omogući raspodelu opterećenja na sva vlakna i da predstavlja efikasnu barijeru za uticaje spoljašnosti. Predmetni

proizvodi se isporučuju u debljinama do 3 mm i širinama do 200 mm, a mogu da imaju praktično neograničenu dužinu (u rolnama). Povezivanje karbonskih traka za konstrukcijske elemente od drveta izvodi se uglavnom lepljenjem uz primenu odgovarajućih epoksidnih lepko-va. Epoksidne lepko-ve karakteriše veoma dobra otpornost na vlagu i hemijske agense, kao i odlične karakteristike prijanjanja. Pored male sopstvene težine i vrlo visokih mehaničkih karakteristika, primena karbo-nskkih traka kao materijala za ojačanje i sanaciju drvenih konstrukcija, nudi dosta pogodnosti kao što su: jedno-stavnost, izuzetna mnogostranost, velika mogućnost oblikovanja, pogodan i lak transport, primena i u ograničenom prostoru (smanjeni troškovi za skelu i radnu snagu), kao i minimalno remećenje objekta i nje-govih korisnika u toku intervencije.

CFRP komoziti u poređenju sa klasičnim građevni-skim čelikom imaju 4-6 puta nižu zapreminsku masu i čak do 10 puta veću čvrstoću na zatezanje. Modul elastičnosti je generalno manji nego kod čelika, ali može biti približno isti (ili nešto veći). Za razliku od čelika koji pokazuje izrazito plastično ponašanje pri zatezanju, ojačanja na bazi karbonskih vlakana imaju elastično ponašanje do loma (slika 1). Što se tiče izduženja pri lomu ono je generalno 5-10 puta manje nego kod klasičnog čelika.



Slika 1. Radni dijagram za karbonske trake i čelik [12]

Karbonske trake imaju nekoliko važnih prednosti u odnosu na čelik kada se razmatraju kao materijal za ojačanje drveta. One su znatno trajnije nego čelik i bolje prijanjaju za drvo, a zbog niskog koeficijenta termičke provodljivosti opstaju duže na visokim temperaturama. Takođe, imaju dobru čvrstoću na zamor, oko tri puta veću od čelika, uz nizak koeficijent termičkog širenja, povoljne karakteristike tečenja i dobru otpornost na koroziju. Drveni elementi ojačani karbonskim trakama pogodni su i za primenu u agresivnoj sredini, jer oba materijala imaju dobru otpornost prema velikom broju hemikalija, dok takođe pokazuju elektromagnetnu neutralnost.

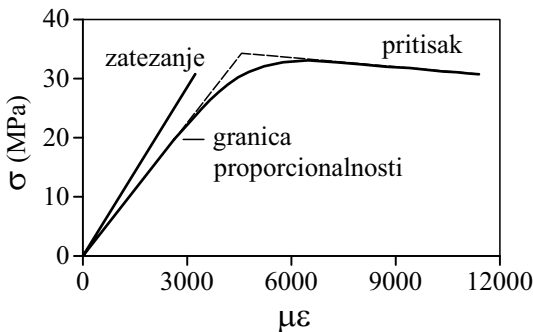
3. KONCEPT OJAČANJA DRVENIH NOSAČA

Drvo se može klasifikovati kao prirodni kompozitni materijal, u kome su vlakna napravljena od celuloze a matrica je lignin. Vlakna daju čvrstoću na zatezanje, dok lignin daje čvrstoću na pritisak.

Generalno gledano, čvrstoća drveta na zatezanje paralelno vlaknima (u daljem tekstu zatezanje) određena na malim „čistim“ uzorcima je 80-100 MPa, što je približno duplo veća vrednost od čvrstoće drveta na pritisak paralelno vlaknima (u daljem tekstu pritisak), koja iznosi 40-50 MPa. Ova značajna razlika ne važi za konstrukcijsko drvo, kod koga prisustvo defekata umanjuje date vrednosti na 10-40 MPa za čvrstoću na zatezanje i 25-40 MPa za čvrstoću na pritisak. Prisustvo defekata u drvetu utiče mnogo više na čvrstoću na zatezanje nego na čvrstoću na pritisak, stoga u važećim standardima vrednosti za ove dve čvrstoće su približno iste.

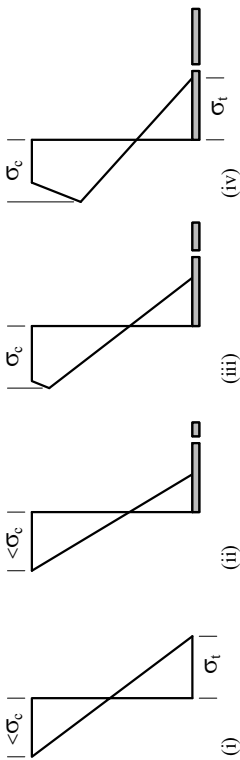
Tipičan dijagram napon-dilatacija za drvo prikazan je na slici 2. Prilikom ispitivanja drveta na zatezanje veza napon-dilatacija je linearna do dostizanja granične čvrstoće, pri čemu se javlja krt lom. Pri pritisku drvo je znatno duktilniji materijal, pokazujući linearnu vezu napon-dilatacija do granice proporcionalnosti, posle čega sledi plastično tečenje do dostizanja granične dilatacije. Tečenje obično proizvodi dug opadajući plato. U svrhu modeliranja, veza napon-dilatacija može se pojedno-

staviti kao bi-linearna aproksimacija, pri čemu se nagib opadajućeg segmenta uzima kao konstantna karakteristika materijala.



Slika 2. Dijagram napon-dilatacija za četinarsko drvo

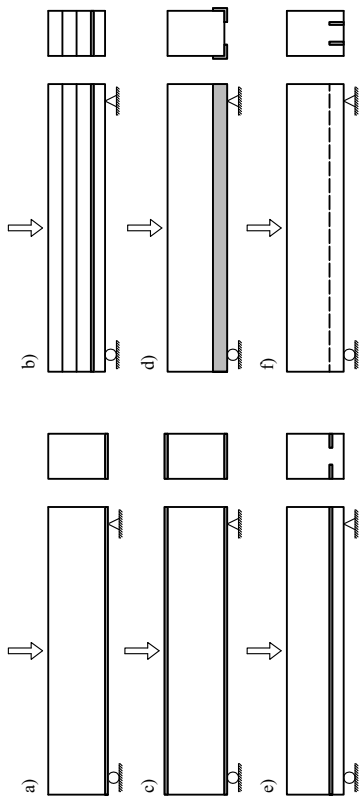
Kod drvenih elemenata napregnutih na savijanje, inicijalni lom nastaje uglavnom u zategnutoj zoni u blizini kvrga, defekta ili na mestima poprečnog nastavka lamela kod lepljenih lameliranih nosača. Lom usled zatezanja drveta izloženog savijanju je krt, nasumičan i teško predvidiv. Linearna veza između napona i dilatacija je pokazatelj elastičnog ponašanja (slika 3i). Međutim, sa ojačanjem drveta stvari se menjaju.



Slika 3. Raspored napona u po visini poprečnog preseka: (i) neojačanog nosača; (ii) (iii) (iv) ojačanog nosača [5]

Prisustvo kompozitnih materijala čini drveni nosač znatno duktilnijim. Ako se efikasno ojačanje postavi u zategnutoj zoni nosač će se ponašati elastično do dostizanja dilatacije tečenja pritisnutog drveta (slika 3ii), a zatim plastično uz pojavu inicijalnog loma u krajnjim vlaknima pritisnute zone. Dalje opterećenje proizvodi preraspodelu napona po visini poprečnog preseka nosača usled gubitka dela kapaciteta nosivosti krajnjih pritisnutih vlakana drveta, što je posledica bi-linearne prirode veze napon-dilatacija. U tom trenutku, pritisnuta vlakna neposredno ispod krajnjih izložena su najvećem naponu i neutralna osa se pomera ka dole, prema zategnutoj strani nosača, kako bi se uravnotežila povećana zatežuća sila ispod neutralne ose (slika 3iii). Ovaj proces se nastavlja sve dok ne dođe do loma u zategnutoj zoni usled dostizanja granične vrednosti čvrstoće (slika 3iv).

Kompatibilnost između drveta i kompozitnog materijala u odnosu na dilatacije pri lomu je ključna za potpuno iskorišćenje čvrstoće drveta. Linearno-elastično ponašanje i veliki kapacitet deformacije karbonskog ojačanja dozvoljavaju da pritisnuta vlakna drveta dostignu njihove dilatacije tečenja i da zategnuta vlakna dosegnu graničnu čvrstoću. Suprotno ovome, kada se čelik koristi kao materijal za ojačanje, drvo neće dostići pun deformacioni kapacitet pre razvlačenja (tečenja) čeličnog ojačanja.



Slika 4. *Primena karbonskih traka za ojačanje drvenih nosača na savijanje*

Ojačanje u zategnutoj zoni može se postići korišćenjem karbonskih traka postavljenih sa spoljašnje strane preseka (slike 4a,c,d) ili unutar drvenog elementa (slike 4b,e,f). Spoljašnja primena je najčešći slučaj ojačanja postojećih konstrukcija. Ovim načinom ojačanja može se sprečiti dalja propagacija postojećih pukotina nastalih usled različitih defekata drveta, a koje mogu prozrokovati značajan pad kapaciteta nosivosti drvenog nosača. Postavljanje ojačanja unutar poprečnog preseka, pored poteškoća u realizaciji, ima nekoliko značajnih prednosti kao što su: veća sigurnost od požara, bolja estetska svojstva, bolja veza drvo-kompozit (dvostruka površina lepljenja) i sprečavanje pojave delaminacije trake. Ojačanje drvenih nosača karbonskim trakama i na zategnutoj i na pritisnutoj strani (slika 4c) bazirano je na konceptu slojevite (sendvič) konstrukcije, sa površinskim slojevima visokih mehaničkih karakteristika i drvetom kao jezgrom. Od ovog tipa ojačanja očekuje se da obezbedi zaštitu od uticaja sredine i time poveća trajnost drvenog elementa [7].

4. EKSPERIMENTALNI DEO

4.1 Materijali

Lepljeni lamelirani drveni nosači su proizvedeni u fabrici „Piramida“ u Sremskoj Mitrovici. Nosači su izra-

đeni od četinarske građe (smreka) I klase kvaliteta. Fizičke i mehaničke karakteristike drveta prikazane su u tabeli 1. Svaki nosač formiran je lepljenjem 7 lamela širine 8 cm i debljine 3 cm, dajući konačne dimenzije poprečnog preseka 8x21 cm. Kako se ispitivanje sprovodi prema EN 408 [2], usvojena je dužina nosača od 4 m, čime je zadovoljen uslov da dužina treba da bude minimum 19 puta veća od visine preseka. Sve lamele su iz komada, bez poprečnog nastavljanja.

Tabela 1. *Fizičke i mehaničke karakteristike drveta (vlažnost 12%)*

Karakteristika	Vrednost
Zapreminska masa	427 kg/m ³
Čvrstoća na zatezanje paraleno vlaknima	28,3 MPa
Čvrstoća na pritisak paraleno vlaknima	36,2 MPa
Čvrstoća na savijanje	42,5 MPa
Modul elastičnosti paraleno vlaknima	11100 MPa

Ojačanje lepljenih lameliranih drvenih nosača izvršeno je karbonskim trakama švajcarskog proizvođača „Sika“, firme koja ima značajno iskustvo u oblasti ojačanja i sanacije betonskih i zidanih konstrukcija. U okviru ovog ispitivanja korišćene su karbonske trake pod oznakom Sika CarboDur S613, širine 60 mm i debljine

1,3 mm. Sika CarboDur trake predstavljaju polimere armirane karbonskim vlaknima sa epoksidnom matricom, a koriste se za ojačanje betonskih, zidanih i drvenih konstrukcija. Reč je o monoaksijalnim trakama sačinjenim od vlakana koja se pružaju samo u podužnom pravcu, pri čemu je zapreminski sadržaj suvih vlakana minimum 68%. Zapreminska masa ovih ojačanja je $1,6 \text{ g/cm}^3$. U tabeli 2 date su mehaničke karakteristike Sika CarboDur traka tip S.

Tabela 2. *Mehaničke karakteristike Sika CarboDur traka tip S (prema tehničkom listu proizvođača)*

Karakteristika	Vrednost
Čvrstoća na zatezanje	3100 MPa
Modul elastičnosti	165000 MPa
Istezanje pri lomu	> 1,70%

Tabela 3. *Mehaničke karakteristike lepka Sikadur-30 (prema tehničkom listu proizvođača)*

Karakteristika	Vrednost
Čvrstoća na pritisak (nakon 7 dana na $+10^{\circ}\text{C}$)	70 - 80 MPa
Čvrstoća na smicanje (nakon 7 dana na $+15^{\circ}\text{C}$)	14 - 17 MPa
Čvrstoća na zatezanje (nakon 7 dana na $+15^{\circ}\text{C}$)	24 - 27 MPa
Modul elastičnosti (na $+23^{\circ}\text{C}$)	11200 MPa

Karbonske trake su zalepljene za nosače od lepljenog lameliranog drveta lepkom Sikadur-30 (proizvođač „Sika“). Sikadur-30 je dvokomponentni, tiksotropni, epoksidni lepak bez sadržaja rastvarača, na bazi kombinacije epoksidnih smola, predviđen za korišćenje na „normalnim“ temperaturama između $+8^{\circ}\text{C}$ i $+35^{\circ}\text{C}$. Preporučuje se za lepljenje karbonskih traka za beton, opeku ili drvo, kao i za lepljenje čeličnih ploča za beton. Mešanjem komponente A (smola) i komponente B (učvršćivač) u odnosu 3:1 po težini ili zapremini, prema uputstvu proizvođača, lepak je spreman za upotrebu. U tabeli 3 date su mehaničke karakteristike lepka Sikadur-30.

4.2 Priprema i lepljenje karbonskih traka

Lepljenje karbonskih traka treba da bude pažljivo pripremljeno. Da bi se ostvarila optimalna veza između drveta i kompozita, drvena površina mora biti ravna, čista i suva. Posebnu pažnju prilikom pripreme podloge treba obratiti na mesta gde će doći krajevi trake, kako bi se osiguralo pravilno „sidrenje“. Takođe, površina karbonske trake mora biti čista od prljavštine i masnoće, koje mogu značajno uticati na efikasnost veze.

Drvena površina je pripremljena saglasno instrukcijama za pravilno povezivanje karbonske trake i drveta datih od strane proizvođača. Da bi se uklonili parčići drveta i prašina, najpre je primenjeno blago šmirglanje u zoni gde se postavlja traka, a zatim i usisavanje (slika 5a). Posle sečenja na potrebnu dužinu, karbonska traka je



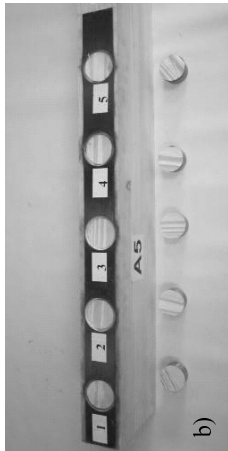
Slika 5. Priprema i lepljenje karbonskih traka

očišćena rastvaračem Sika Colma Cleaner, kako bi se skinula sva nečistoća (slika 5b). Lepak Sikadur-30 nanet je pomoću specijalne prevlake na očišćenu karbonsku traku (slika 5c). Tanak sloj lepka nanet je i na pripremljenu drvenu podlogu pomoću špahtle (slika 5d). Unutar „otvorenog“ vremena trajanja lepka, karbonska traka je zalepljena na drvenu površinu. Lepljenje karbonske trake je započeto sa jednog kraja nosača (slika 5e) i praćeno je adekvatnim pritiskanjem gumenim valjkom sa ciljem da se suvišan lepak izbací sa strana trake (slika 5f). Sav višak lepka je uklonjen. Kako bi se obezbedio pravilan spoj, uzorci su čuvani sedam dana na sobnoj temperaturi 22 ± 2 °C.

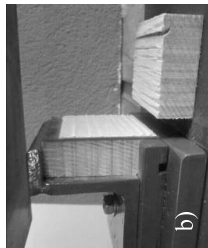
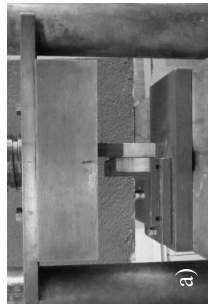
4.3 Procena kvaliteta veze karbonska traka-drvo

Kvalitet ostvarene veze između karbonske trake i drvene podloge procenjen je pull off testom i testom smicanja. Ovo istraživanje je kvantitativne prirode, sa ciljem da se verifikuje procedura lepljenja i utvrdi oblik loma.

Pull off test je izveden pomoću čeličnih cilindara (prečnika 50 mm) zalepljenih za uzorak epoksidnim lepkom (slika 6a). Ispitivanje je izvršen na pet mesta kontrolisanom silom zatezanja do loma. Srednja vrednost graničnog opterećenja iznosila je 5077 N, a srednja



Slika 6. *Pull off test*



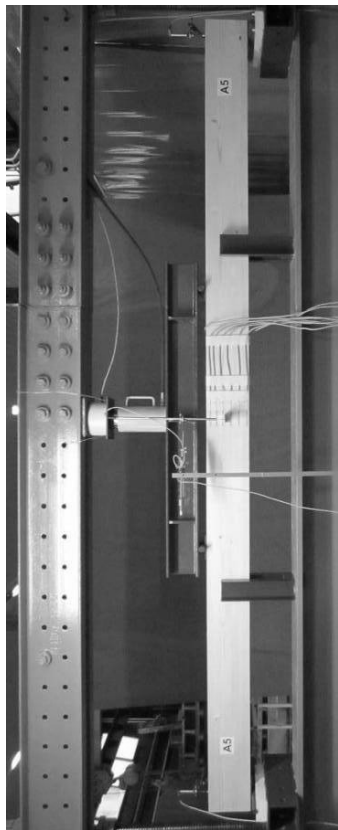
Slika 7. *Test smicanja*

vrednost napona zatezanja upravno na vlakna 2,58 MPa. Površina loma je uvek unutar drvenog preseka (slika 6b), pokazujući na taj način dobru vezu između karbonske trake i drvene podloge.

Pet uzoraka, koji se sastoje od dva drvena komada dimenzija 5x5x2 cm između kojih je zalepljeno parče karbonske trake, ispitano je na smicanje uz pomoć pritiskivača kojim se deluje u ravni spoja (slika 7a). Uzorci su ispitani do loma kontrolisanom silom pritiska. Srednja vrednost smičućeg napona koji deluje preko smičuće površine iznosila je 2,72 MPa. U svim slučajevima, površina po kojoj se dogodio lom obuhvatila je drvenu podlogu (slika 7b), što ponovo pokazuje dobru vezu između karbonske trake i drveta.

4.4 Metod ispitivanja

Ispitivanja o kojima je reč sprovedena su na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Svi nosači ispitani su na savijanje kao proste grede raspona 378 cm (18 puta visina nosača) opterećene koncentrisanim silama u trećinama raspona, u skladu sa EN 408 [2]. Ovakvim rasporedom sila, u srednjoj trećini nosača dobijen je konstantan momenat savijanja, bez transverzalne sile. Opterećenje je aplicirano putem hidrauličke panj prese kapaciteta 350 kN, a mereno preko dozne nosivosti 200 kN. U eksperimentalnoj proceduri, optere-

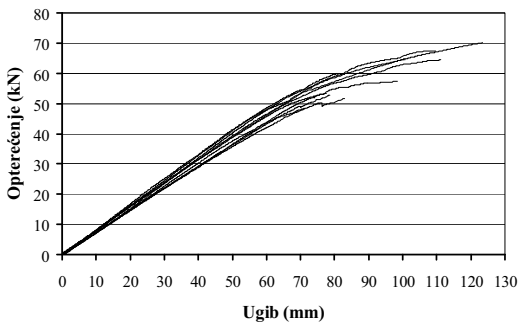
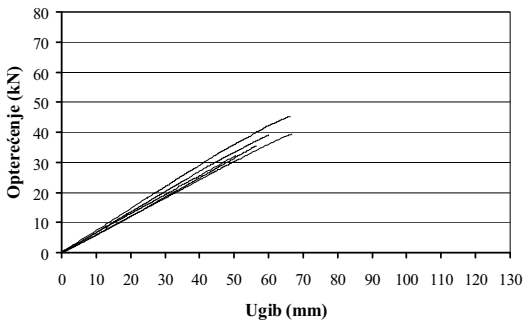


Slika 8. Nosač u ramu za ispitivanje

ćenje je transformisano sa jedne na dve koncentrisane sile pomoću jakog čeličnog profila (IPE 160). Slobodno oslanjanje nosača omogućeno je primenom valjkastih čeličnih ležaja prečnika 30 mm. Takođe, valjkasti ležaji korišćeni su na mestima nanošenja sila, kako bi se obezbedilo „čisto“ vertikalno opterećenje. Čelične ploče debljine 8 mm postavljene su ispod tačaka opterećenja i na osloncima sa ciljem da minimiziraju lokalna oštećenja (gnječenje) drveta. Dva bočna ukrućenja su predviđena da spreče eventualno bočno izvijanje nosača. Prikaz jednog nosača u ramu za ispitivanje dat je na slici 8.

Ugib neojačanih i ojačanih nosača meren je u sredini raspona i na osloncima pomoću induktivnih ugibomera. Pored ovoga, u sredini raspona merene su i dilatacije po visini nosača koristeći merne trake. Ovo je neophodno kako bi se utvrdio stepen plastifikacije drveta u pritisnutoj zoni, kao i odredilo pomeranje položaja neutralne ose preseka usled ojačanja. Snimanje mernih podataka obavljeno je uz pomoć akvizicionog sistema, očitavanjem instrumenata svake sekunde.

Opterećenje je nanošeno kontrolisanom brzinom 4,5 kN/min, sa ciljem postizanja loma nosača za aproksimativno 10-15 min. Pre ispitivanja uzorci su kondicionirani na temperaturi 20 ± 2 °C i vlažnosti vazduha 65 ± 5 %, posle čega je izmerena vlažnost drveta približno 12%.



Slika 9. *Dijagrami opterećenje-ugib za neojačane nosače (gore) i ojačane nosače (dole)*

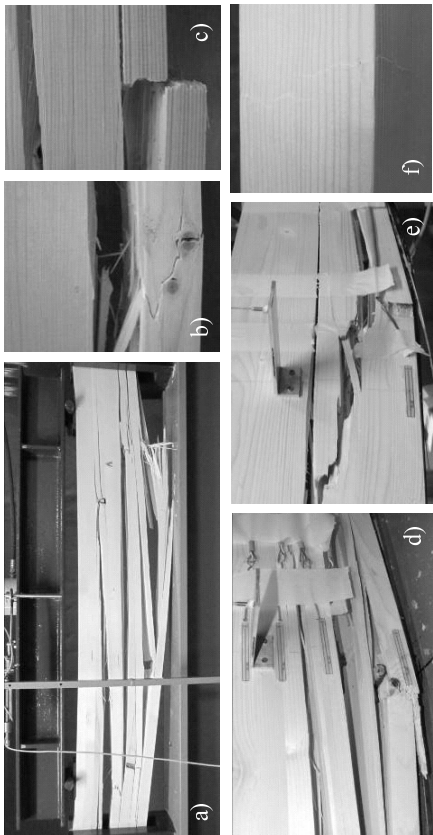
5. REZULTATI I DISKUSIJA

5.1 *Dijagram opterećenje-ugib i oblik loma*

Ponašanje do loma neojačanih i ojačanih nosača, izraženo preko dijagrama opterećenje-ugib u sredini raspona, prikazano je na slici 9.

Kod svakog od neojačanih nosača kolaps se dogodio unutar elastične oblasti usled loma u zategnutom delu nosača. Kao posledica krtog ponašanja drveta pri zatezanju, lom se dogodio iznenada, bez ikakvih naznaka pre dostizanja graničnog opterećenja. Katastrofalna priroda loma neojačanih nosača prikazana je na slici 10a. U četiri od pet ispitanih uzoraka pukotine su inicirane na mestima grešaka građe drveta (npr. kvрге) u zategnutoj zoni nosača, nedaleko od sredine raspona (slika 10b). Kod jednog od uzoraka lom se dogodio po čistom drvetu u krajnjoj lameli, takođe, u zategnutoj zoni nosača (slika 10c). Ni u jednom od neojačanih nosača nema tragova plastifikacije na pritisnutim lamelama drvenog nosača.

Kod nosača ojačanih sa jednom karbonskom trakom na donjoj (zategnutoj) strani, najčešći mehanizam loma je lom drveta usled zatezanja, sa ili bez delimične plastifikacije pritisnute zone nosača. Sa dijagrama opterećenje-ugib može se videti da je početna veza napona i dilatacija ovih nosača linearana do pojave lokalnog oštećenja izazvanog prisustvom defekata drveta



Slika 10. Oblici loma nosača

u zategnutoj zoni. Tečenje drveta je izazivalo nelinearan odgovor koji se završio iznenadnim padom opterećenja usled loma drveta u zategnutoj zoni u okviru srednje trećine raspona (slike 10d i 10e). Kod pojedinih nosača vidljivi su tragovi plastifikacije u formi zbijanja drvenih vlakana (slika 10f), ali generalno se može reći da je pritisnuta zona ostala nedeformisana. Rezultati su pokazali da se kod sedam od deset ispitanih uzoraka lom dogodio u zategnutim lamelama na mestu defekta i diskontinuiteta u drvetu, dok se kod dva uzorka lom dogodio po čistom drvetu u krajnjoj lameli zategnute strane nosača. Smičući lom, pre dostizanja graničnog opterećenja, desio se u jednom nosaču, što je okarakterisano kao posledica razdvajanja između srčevine i beljiovine unutar jedne drvene lamele. U nekim slučajevima, lom izazvan prekoračenjem napona zatezanja u drvetu je bio eksplozivne prirode, što je prouzrokovalo odvajanje kompozitnog materijala (slika 10e). Ostvarena adhezija između drveta i karbonske trake narušena je jedino posle loma u drvetu.

Nosači od lepljenog lameliranog drveta ojačani karbonskim trakama pokazali su znatno duktilnije ponašanje u odnosu na neojačane. Duktilnost ojačanih nosača umnogome zavisi od kvaliteta drvenih lamela u donjoj (zategnutoj) zoni i što su kvalitetnije lamele smeštene u blizini karbonske trake to je duktilnost veća.

5.2 Nosivost i krutost

Pregled eksperimentalnih rezultata u smislu maksimalnog opterećenja, ugiba u sredini raspona pri maksimalnom opterećenju, maksimalnog momenta savijanja i krutosti na savijanje dat je u tabeli 4. Za dijagrame opterećenje-ugib prikazane na slici 9, elastična oblast do polovine graničnog opterećenja je razmatrana prilikom određivanja krutosti na savijanje nosača.

Tabela 4. Pregled rezultata ispitivanja

Procenat ojačanja: $\rho = 0,46 \%$	Neojačani nosači	Ojačani nosači
Maksimalno opterećenje (kN)		
Srednja vrednost	38,3	59,1
Koef. varijacije (%)	17,1	12,4
Maksimalni moment savijanja (kNm)		
Srednja vrednost	24,1	37,2
Koef. varijacije (%)	17,1	12,4
Ugib pri max opterećenju (mm)		
Srednja vrednost	60,0	93,8
Koef. varijacije (%)	15,4	18,6
Krutost na savijanje EI (kNm ²)		
Srednja vrednost	6543	7727
Koef. varijacije (%)	9,6	4,9

Poredeći sa kontrolnim neojačanim nosačima, kolaps ojačanih nosača nastao je pri znatno većim optereće-

njima. Rezultati ispitivanja uzoraka ojačanih karbonskim trakama pokazali su povećanje srednje vrednost granične nosivosti od 54,3% u odnosu na kontrolne uzorke. Osim ovoga, zabeležen je i niži koeficijent varijacije. Redukcija u varijaciji mehaničkih karakteristika može u budućnosti učiniti proračun drvenih konstrukcija manje konzervativnim [15].

Nosači od lepljenog lameliranog drveta ojačani karbonskim trakama pretrpeli su veću deformaciju pre loma. Poredeći rezultate, ojačani nosači pokazali su povećanje od 56,2% ugiba u sredini raspona pri maksimalnom opterećenju.

Upotreba materijala sa visokim modulom elastičnosti, kakav su karbonske trake, rezultirala je povećanjem krutosti na savijanje od 18,1% u odnosu na neojačane nosače. Prisustvo ojačanja u poprečnom preseku efikasno je smanjilo ugibe u elastičnoj oblasti. Ovaj efekat je poželjan sa aspekta graničnog stanja upotrebljivosti kako bi se obezbedila udobnost eksploatacije drvenih konstrukcija.

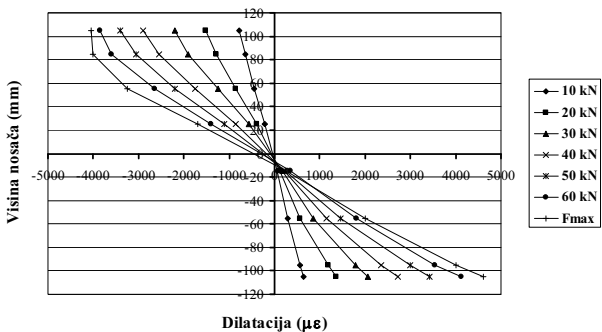
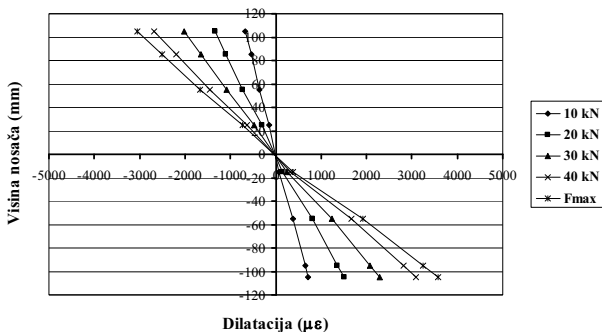
5.3 Raspored dilatacija u preseku

Tipični primeri raspodele dilatacija po visini poprečnog preseka za neojačane i ojačane nosače, za različite nivoe opterećenja, prikazani su na slici 11. Ovi dijagrami pokazuju dilatacije pritiska i zatezanja, kao

negativne i pozitivne vrednosti, na x osi i pozicije mernih traka po visini poprečnog preseka, u odnosu na sredinu drvenog preseka, na y osi.

Dilatacije pritiska i zatezanja su simetrične kod neojačanih nosača. Raspodela dilatacija u preseku sasvim je linearna do loma, potvrđujući pretpostavku teorije savijanja da ravni preseki pri deformaciji ostaju ravni. Linearna raspodela dilatacija vidljiva je u elastičnoj oblasti ponašanja ojačanih nosača. Kod nosača gde je plastično ponašanje pritisnute zone dostignuto, može se primetiti nelinearna raspodela dilatacija blizu stanja loma. Usled doprinosa karbonske trake kao zategnutog elementa, neutralna osa je pomerena prema zategnutoj strani nosača. Nije zabeležena znatna varijacija u položaju neutralne ose između stanja elastičnog i plastičnog ponašanja. Dilatacije izmerene na karbonskoj traci slažu se vrlo dobro sa dilatacijama izmerenim na drvenom preseku, što ukazuje da nema primetnog klizanja između drvene podloge i karbonske trake.

Ojačani nosači pokazali su znatno poboljšanje u dilatacijama. Može se videti da prisustvo karbonskog ojačanja premošćava lokalne defekte u drvetu i omogućava povećanje maksimalne dilatacije zatezanja drveta. Osim toga, ovo ojačanje omogućava i veće dilatacije u pritisnutoj zoni, zahvaljujući većem rastojanju krajnjih pritisnutih vlakana drveta od neutralne ose.



Slika 11. Raspored dilatacija po visini poprečnog preseka za neojačani nosač (gore) i ojačani nosač (dole)

6. ZAKLJUČAK

Primena karbonskih traka predstavlja povoljno rešenje za ojačanje (sanaciju) drvenih nosača. Pored svoje jednostavnosti, ova tehnika omogućava značajno poboljšanje nosivosti i krutosti ojačanih konstrukcijskih elemenata. Osim toga, čini ponašanje konstrukcije znatno duktilnijim. Prisustvo karbonskih ojačanja sprečava otvaranje pukotina, ograničava lokalna oštećenja i premošćava lokalne defekte u drvetu. Strateško postavljanje karbonskih ojačanja u zonu najvećih napona zatezanja omogućava da pritisnuta vlakna drveta dostignu dilatacije tečenja, a samim tim i bolje iskorišćavanje mehaničkih karakteristika drveta.

Bez obzira na visoke mehaničke karakteristike i druge pogodnosti koje karbonske trake pružaju, dodatna istraživanja su neophodna pre široke primene ove tehnike ojačanja. Budućim istraživanjima treba da se ispita uticaj različitih karakteristika materijala (drveta, kompozitnog ojačanja, kao i lepka) i različite geometrije na nosivost i krutost drvenih nosača kako za granično stanje nosivosti, tako i za granično stanje upotrebljivosti. Još jedno važno pitanje koje treba razmatrati odnosi se na ponašanje tokom vremena ojačanih nosača, sa posebnom pažnjom na zamor i tečenje materijala. Osim ovoga, da bi ovaj metod ojačanja bio praktičan i ekonomičan za svakodnevnu primenu potrebno je utvrditi realan proračunski model i dati odgovarajuće proračunske smernice.

7. LITERATURA

- [1] BORRI, A., CORRADI, M., GRAZINI, A.: *A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials*, Compos Part B, 36, 143-53, (2005)
- [2] EN 408: *Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties*, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium; (2010)
- [3] FIORELLI, J., DIAS, A.A.: *Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: theoretical and experimental evaluation*, Mater Struct, 44, 1431-40, (2011)
- [4] GENTILE, C., SVECOVA, D., RIZKALLA, S.H.: *Timber beams strengthened with GFRP bars: development and applications*, J Compos Construct, 6 (1), 11-20, (2002)
- [5] GILFILLAN, R.J., GILBERT, S.G., PATRIC, G.R.H.: *The use of FRP composites in enhancing the structural behaviour of timber beams*, J Reinf Plast Compos, 22 (15), 1373-88, (2003)
- [6] HAY, S., THIESSEN, S., SVECOVA, D., BAKHT, B.: *Effectiveness of GFRP sheets for shear strengthening of timber*, J Compos Construct, 10 (6), 483-91, (2006)

- [7] HERNANDEZ, R., DAVALOS, J.F., SONTI, S.S., KIM, Y., MOODY, R.C.: *Strength and stiffness of reinforced yellow-poplar glued-laminated beams*, Res. Pap. FPL-RP-554, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, USA, (1997)
- [8] JANKOWSKI, L.J., JASIENKO J., NOWAK, T.P.: *Experimental assessment of CFRP beams by 4-point bending tests and photoelastic coating technique*, Mater Struct, 43, 41-50, (2010)
- [9] JOHNS, K.C., LACROIX, S.: *Composite reinforcement of timber in bending*, Can J Civ Eng, 27 (5), 899-906, (2000)
- [10] JOHNSON; H., BLANKSVARD, T., CAROLIN, A.: *Glulam members strengthened by carbon fibre reinforcement*, Mater Struct, 40, 47-56, (2006)
- [11] LARSEN, H.J., GUSTAFSSON, P.J., ENQUIST, B.: *Test with glass-fibre reinforcement of wood perpendicular to the grain*, Report TVSM-7067, Div. of Structural Mechanics, Lund University, Lund, Sweden, (1993)
- [12] MURAVLJOV, M., JEVIĆ, D., ZAKIĆ, D., SAVIĆ, A., GAVRILOVIĆ, D.: *Ispitivanje svojstava i primeri primene karbonskih traka za ojačanje betonskih konstrukcija*, Materijali i konstrukcije, 51 (4), 42-49, (2008)

- [13] RAFTERY, G.M., HARTE, A.M.: *Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate*, Compos Part B, 42 (4), 724-35, (2011)
- [14] SCHÖBER, K.U., RAUTENSTRAUCH, K.: *Post-strengthening of timber structures with CFRP's*, Mater Struct, 40, 27-35, (2006)
- [15] SVECOVA, D., EDEN, R.J.: *Flexural and shear strengthening of timber beams using glass fibre reinforced polymer bars - an experimental investigation*, Can J Civ Eng, 31, 45-55, (2004)
- [16] TRIANTAFILLOU, T.C.: *Shear reinforcement of wood using FRP material*, J Mater Civil Eng - ASCE, 9 (2), 65-69, (1997)