

**Иван ГЛИШОВИЋ, Марија ТОДОРОВИЋ, Бошко СТЕВАНОВИЋ**

## **ОЈАЧАЊЕ ДРВЕНИХ КОНСТРУКЦИЈА FRP КОМПОЗИТНИМ МАТЕРИЈАЛИМА**

### *FRP REINFORCEMENT OF TIMBER STRUCTURES*

**Др Иван ГЛИШОВИЋ, дипл.грађ.инж.**  
ванредни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду

**др Марија ТОДОРОВИЋ, мастер инж.грађ.**  
доцент Грађевинског факултета Универзитета у Београду

**др Бошко СТЕВАНОВИЋ, дипл.грађ.инж.**  
редовни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду, у пензији

#### *Резиме*

Полимери ојачани влакнима (Fiber reinforced polymers - FRP) се користе као ојачање за елементе дрвених конструкција у циљу повећања крутости и/или носивости, као и за контролу отварања и пропагације пукотина. FRP ојачање се може применити на новопроектованим елементима или при санацији оштећених елемената конструкције. У оквиру рада даје се детаљан преглед сазнања у вези са дрвеним конструкцијама ојачаним FRP материјалима. Најпре су представљени саставни делови FRP композита, а затим је размотрена типична примена FRP ојачања у оквиру дрвених конструкција. На крају, као илустрација, приказани су резултати сопствених експерименталних истраживања спроведених на лепљеним ламелираним дрвеним носачима који су ојачани глобално тракама на бази карбонских влакана или локално шипкама на бази стаклених влакана.

Кључне речи: FRP композити, ојачање, примена, дрвене конструкције, испитивање на савијање

#### *Summary*

Fibre reinforced polymers (FRP) have been used as reinforcement for timber structural elements to increase stiffness and/or strength and to control crack initiation and development. FRP reinforcement can be applied to newly constructed elements or for the repair of damaged elements. This paper provides a summary of recent developments regarding FRP-reinforced timber structures. Firstly, the components of FRP composites are introduced. Subsequently, typical applications of FRP in reinforcement of timber structures is discussed. Finally, the results of a comprehensive experimental study carried out on glued laminated timber beams reinforced globally with carbon fibre reinforced polymer (CFRP) plates or locally with glass fibre reinforced polymer (GFRP) rods are shown.

Keywords: FRP composites, reinforcement, application, timber structures, bending tests

## 1. УВОД

Проблеми трајности и ефикасности елемената конструкција повезани са пропадањем и деградацијом услед преоптерећења, старења и различитих оштећења током експлоатације резултирали су потребом за развојем нових, напредних материјала и технологија у грађевинарству. Ови савремени материјали и технологије треба с једне стране да допринесу трајнијем, ефикаснијем и економичнијем решавању бројних проблема везаних за санацију и ојачање постојећих конструкција, а с друге стране да повећају поузданост и експлоатациони век нових објеката.

У прошлости, различите технике ојачања, са различитим степеном ефикасности, испитане су са циљем повећања крутости и носивости дрвених конструкција. Истраживања су углавном била фокусирана на употребу металних ојачања (челичне плоче или шипке, алуминијумске плоче) [1]. Овакве методе су једноставне и ефикасне, али имају одређене недостатке као што су: повећање сопствене тежине, тешкоће при транспорту и извођењу, трошкови одржавања и некомпатибилност са основним материјалом. Традиционалне методе генерално захтевају употребу механичких спојних средстава (нпр. завртњева или ексера) која могу бити неефикасна у оштећеном дрвету. Осим овога, челични елементи су осетљиви на корозију, а алуминијумске плоче су склоне избочавању при термичким дејствима.

Последњих година, повећана доступност и све нижа цена полимера ојачаних влакнима (Fibre Reinforced Polymers - FRP) омогућила је њихову примену у области ојачања грађевинских конструкција. Ови композитни материјали су доступни као готови фабрички производи у облику трака, тканина или шипки, различитих дебљина и ширина, односно пречника, уз практично неограничене дужине. Поред мале сопствене тежине и врло високих механичких карактеристика, примена FRP композита нуди доста погодности као што су: једноставност, изузетна многостраност, велика могућност обликовања, погодан и лак транспорт, примена и у ограниченом простору (смањени трошкови за скелу и радну снагу), као и минимално ремећење објекта и његових корисника у току интервенције [2,3]. FRP материјали, такође, показују одличну трајност у односу на друге конвенционалне грађевинске материјале. Као резултат њихове примене, трошкови одржавања конструкције се могу редуковати.

Успешна примена композитних материјала у комбинацији са дрветом је изводљива захваљујући компатибилности и комплементарности њихових карактеристика. На пример, мала тежина дрвета, што је једна од најзначајнијих карактеристика, није угрожена применом композитних ојачања. Поред овога, најочигледнији недостатак дрвета, какав је изразита механичка хетерогеност услед присуства бројних дефеката, може се умањити повезивањем са другим конструктивно ефикасним материјалом какав је FRP композит.

Комбинација дрво-FRP има, такође, и нека ограничења која су последица природе датих материјала, укључујући различито понашање у односу на варијације влажности и температуре, као и понашање при пожару [4]. Још једно важно питање односи се на интегритет споја између два материјала [5,6].

Иако су спроведена обимна истраживања примене FRP композита за ојачање или санацију армиранобетонских и зиданих конструкција, доступне су релативно ограничене информације везано за примену у дрвеним конструкцијама. Највећа пажња постојећих истраживања усмерена је ка ојачању дрвених елемената на савијање. Ојачање дрвених елемената на смицање, као и локално ојачање на затезање управно на влакна и санација у случају оштећеног краја су, такође, били предмет различитих истраживања. Још једна могућа примена односи се на укрућење конструкција изложених дејствима у равни.

## 2. FRP КОМПОЗИТИ

Полимери ојачани влакнима су група напредних композитних материјала који се састоје од влакана високих механичких својстава (као микро-арматуре) повезаних изузетно чврстом, хемијски отпорном и трајном синтетичком смолом (као матрицом). Влакна могу бити постављена само у једном правцу (подужно) и тада је композит моноаксијалан. Такође, влакна могу бити уплетена у форму тканине, односно бити постављена у више праваца и тада је композит би-аксијалан или мулти-аксијалан. Компатибилност између влакана и матрице је кључна за производњу FRP композита.

Влакна и матрица у оквиру композита задржавају свој физички и хемијски идентитет, а ипак заједно производе одређена својства која не могу бити достигнута када делују самостално.

Зависно од захтеваних физичких и механичких карактеристика, као и од економских разматрања, композити могу бити сачињени од различитих типова влакана и полимерних матрица, и прилагођени да обезбеде потребну носивост и крутост у жељеним правцима.

## 2.1. Влакна

У FRP материјалима, влакна обезбеђују крутост и носивост композита. Влакна могу бити природна и вештачка. За примену у грађевинарству доминирају два типа вештачких влакана неорганског порекла: карбонска и стаклена. Одређену примену имају и араמידна влакна, која представљају вештачка влакна органског порекла. Вештачка влакна имају различите карактеристике, укључујући и цену, што чини једну врсту више погодном од друге врсте за различите намене. Сва влакна имају генерално велики капацитет носивости (већи од обичног челика) и линеарно-еластично понашање до лома. Најважније карактеристике које се разликују између различитих типова влакана су крутост и издужење при лому.

Стаклена влакна имају добре механичке карактеристике (и у подужном и у попречном правцу) комбиновано са високом хемијском отпорношћу и одличним изолационим својствима. Неки од недостатака су релативно низак модул еластичности, мала отпорност на замор, осетљивост на хабање и на влагу, као и склоност ка деформацијама течења. Е-стаклена влакна се најчешће користе због њихових добрих механичких карактеристика и релативно ниске цене. FRP композити који су базирани на стакленим влакнима су обично означени као GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer).

Карбонска влакна имају високе механичке карактеристике у правцу влакана и знатно ниже у попречном правцу (анизотропно понашање). Ова влакна имају суштински крто понашање са релативно ниском апсорпцијом енергије, па ипак њихова отпорност на замор је већа у поређењу са стакленим влакнима. Коефицијент термичког ширења карбонских влакана је негативан, што их чини димензионално стабилним. Основне предности карбонских влакана су изузетно висока чврстоћа и релативно висока крутост, одлична трајност и добра реолошка својства. Главни ограничавајући фактор за примену карбонских влакана је њихова цена. FRP композити који су базирани на карбонским влакнима су обично означени као CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer).

Природна влакна се могу класификовати као: влакна биљног порекла (тј. лигно-целулозна), животињска влакна (нпр. вуна) и минерална влакна (нпр. базалт). Базалтна влакна су једна од природних влакана која су се значајно развила последњих година. Њихова цена је једнака или нешто мања од стаклених влакана, док им је чврстоћа упоредива са чврстоћом карбонских влакана. С друге стране, концепт одрживог развоја довео је до повећаног интереса за развојем композита на бази природних влакана биљног порекла. Влакна се најчешће извлаче из стабљике биљака, што је случај код бамбуса, лана, конопље, јуте, кенафа (биљка из породице хибискуса) и рамије (биљка из породице коприве). Такође, влакна се могу добити из лишћа, као код биљака сисал (агава) и абака (дивља банана), или из семених чаура (памук) и спољне љуске плода (кокосова палма). И поред присутних недостатака (велика варијабилност својстава, релативно ниска чврстоћа, димензионална нестабилност услед високе апсорпције влаге, ниска трајност), занимљиве карактеристике као што су: висока специфична чврстоћа, крутост као код стаклених влакана, ниска цена, широка доступност, ниска емисија CO<sub>2</sub> током производње, неабразивно дејство, могућност рециклаже, биоразградивост, дају овим влакнима значајне могућности за примену у виду ојачања конструкцијских елемената.

У табели 1 су приказана механичка својства различитих природних и вештачких влакана добијених експерименталним испитивањем појединачних влакана на затезање.

## 2.2. Матрица

Матрица је везивни материјал са основним задатком да држи влакна заједно и сачува њихову оријентацију. Улога матрице је и да штити влакна од дејства спољашњег окружења и механичког хабања. Поред тога, матрица има велики утицај на чврстоће на притисак и смицање, као и на чврстоћу у попречном правцу FRP композита. Полимерне матрице се обично класификују у две категорије, зависно од тога како реагују на топлоту: термостабилне и термопластичне.

Приликом производње FRP композитних материјала за примену у грађевинарству као матрице најчешће се користе термостабилни полимери. Основне предности термостабилних полимера су: низак вискозитет који омогућава релативно лаку импрегнацију влакана, добра адхезиона својства, могућност очвршћавања на собним

Табела 1. Поређење карактеристика различитих врста природних и вештачких влакана [7-10]

Влакна	Запреминска маса (g/cm <sup>3</sup> )	Чврстоћа на затезање (МПа)	Модул еластичности (GPa)	Издужење при лому (%)
Бамбус	0,6-1,1	140-800	11-32	2,5-3,7
Кокос	1,15-1,45	95-230	2,8-6	15-25
Памук	1,5-1,6	287-800	5,5-12,6	3-10
Лан	1,4-1,5	343-2000	27,6-103	1,2-3,3
Конопља	1,4-1,5	270-900	23,5-90	1,0-3,5
Јута	1,3-1,5	320-800	30	1,0-1,8
Кенаф	1,4-1,5	223-930	14,5-53	1,5-2,7
Рамија	1,0-1,5	400-1000	24,5-128	1,2-4,0
Сисал	1,3-1,5	363-700	9-38	2-7
Базалт	1,5-2,7	860-3450	82-100	2,0-3,5
Е-стакло	2,5	2000-3500	70-80	3,5-4,5
Карбон	1,75	4000-5000	200-240	1,4-1,8
Арамид	1,4	3000-3150	63-67	3,3-3,7

Табела 2. Поређење карактеристика различитих термостабилних полимера [7-10]

Полимер	Запреминска маса (g/cm <sup>3</sup> )	Чврстоћа на затезање (МПа)	Модул еластичности (GPa)	Издужење при лому (%)
Епоксид	1,1-1,4	35-130	3,0-6,0	1,0-1,85
Полиестер	1,2-1,5	40-90	2,0-4,5	2,0-5,0
Винилестер	1,2-2,4	65-90	3,0-4,0	1,0-5,0

температурама, добра отпорност на хемијске агенсе, термичка стабилност и добра трајност. Суштински недостаци су: ограничени опсег радних температура, мала жилавост (крто понашање), тенденција ка апсорпцији влажности из окружења. Најчешће коришћени термостабилни полимер за FRP композите је епоксид. Полиестер и винилестер се такође употребљавају. У табели 2 су приказане карактеристике матрица на бази ових врста полимера.

Епоксиде карактеришу високе механичке карактеристике, добра отпорност на влагу, хемијске агенсе и повишене температуре, као и одлична адхезивна својства. Одликују се малом жилавошћу, тако да имају релативно мала издужења при прекиду. Епоксиди очвршћавају споро и прилично су крти после потпуног очвршћавања.

FRP композитни материјали су такође доступни са термопластичним полимерима. Основни недостаци за примену термопластичних полимера су њихов висок вискозитет, који чини импрегнацију влакана тешком, као и потреба за комплексном и скупом радном опремом. У грађевинарству термопластични полимери се ретко користе због слабе хемијске отпорности, великог скупљања и слабе трајности. Поред тога, ови полимери уобичајено имају нижу крутост и

чврстоћу од термостабилних полимера. Међутим, термопластични полимери имају неке предности у односу на термостабилне полимере, као што су: ниска тачка топљења, лакоћа обраде, могућност рециклирања и велика жилавост (дуктилно понашање). Неке од врста термопластичних полимера које се користе за FRP композите су полиетилен, полистирол и полипропилен.

### 3. ПОВЕЗИВАЊЕ FRP КОМПОЗИТА ЗА КОНСТРУКЦИЈСКЕ ЕЛЕМЕНТЕ

Успешна примена FRP композита као ојачања конструкцијских елемента захтева да високо квалитетни (трајни) спој буде остварен између два различита материјала. Ако квалитет споја није одговарајући, FRP композит ће бити подложен деламинацији и неће се остварити одговарајуће спрегнуто дејство, а може доћи до превременог лома ојачаног елемента.

Имплементација FRP ојачања (траке, тканине, шипке) обично се изводи лепљењем. Постоји више предности примене лепљеног споја у односу на спој остварен механичким спојним средствима. Неке од предности су: способност доброг приањања између два различита

материјала, велика крутост споја, равномерна расподела оптерећења и избегавање концентрације напона која је обично повезана са механичким спојним средствима. На другој страни, лепкови су осетљиви на услове средине, као што је промена влажности, а њихове механичке карактеристике и трајност се значајно смањују када су изложени повишеним температурама. Поред тога, примена лепкова на терену може бити тешка, а квалитет лепљења није лако проценити. Ефикасност и трајност лепљеног споја зависи од много фактора, као што су: припрема подлоге, хемијска композиција и вискозитет лепка, техника наношења лепка, као и процес очвршћавања лепка.

На тржишту су доступни бројни типови природних или синтетичких лепкова (еластомери, термопластични и термостабилни лепкови). Ипак, избор одговарајућег лепка треба да буде начињен на основу компатибилности материјала и услова средине. У оквиру техничког листа за FRP производ, произвођач обично наводи који лепак треба применити, као и релевантне процедуре за наношење и контролу квалитета лепка. Највећу примену за повезивање FRP материјала и дрвета имају лепкови на бази епоксида. Епоксидни лепкови показују добра својства попуњавања пора и шупљина на спојним површинама, ограничено скупљање током времена очвршћавања, способност очвршћавања на амбијенталним температурама и захтевају само минимални притисак у процесу повезивања.

Поступак лепљења FRP трака подразумева да се најпре лепак нанесе на дрвену површину, а затим трака постави на лепак уз одговарајући притисак. За примену FRP тканина обично се користи метод „мокрог полагања“, који подразумева да се тканина импрегнира лепком приликом наношења на дрвену подлогу. FRP шипке се уграђују у претходно формиране просторе унутар дрвог елемента (прорези, жлебови, рупе) испуњене лепком.

#### 4. ОБЛАСТ ПРИМЕНЕ

Дрво се, као грађевински материјал, данас комбинује са различитим материјалима у циљу побољшања понашања дрвених конструкција при различитим напрезањима. Спрегнуто дејство води ка бољем искоришћењу попречног пресека елемената конструкције, на начин што се спречава појава прераног лома у критичним зонама. Високе механичке карактеристике

композитних материјала могу значајно повећати носивост и крутост ојачаних елемената, али и учинити дрвену конструкцију знатно поузданијом. Осим тога, присуство ојачања може умањити варијабилност у својствима дрвета, што омогућава да се прорачун дрвених конструкција учини мање конзервативним (могућност примене мањих коефицијената сигурности у оквиру стандарда и прописа).

FRP ојачање се може применити код ново-пројектованих дрвених конструкција или у случају санације и реконструкције постојећих дрвених конструкција. Са једне стране, захваљујући побољшању механичких својстава, могуће је редуковати димензије попречних пресека елемената конструкције или користити дрвену грађу лошијег квалитета. Са друге стране, може се рехабилитовати носивост оштећених елемената, или продужити употребљивост и трајност неоштећених елемената постојеће конструкције.

Ојачање FRP композитима дрвених конструкција може бити глобално или локално. Глобално ојачање се примењује са циљем побољшања глобалних перформанси, као што су капацитет момента савијања или деформација (побољшање носивости и крутости). Локално ојачање се примењује са циљем повећања отпорности дрвета као материјала на локалну концентрацију напона (или ради контроле прекомерних дилатација).

##### 4.1. Ојачање на савијање

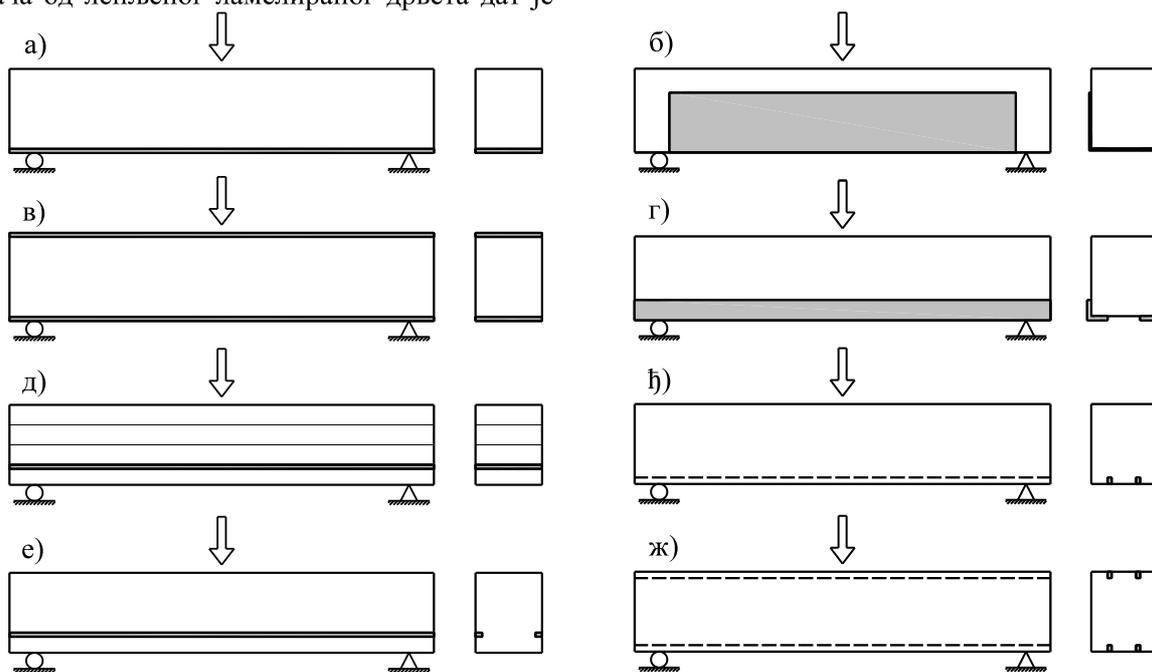
Најчешћа примена FRP материјала као ојачања дрвених конструкција односи се на елементе изложене савијању [11-25], укључујући појединачне греде (носаче), греде међуспратних конструкција и елементе сложенијих конструкција као што су решеткасте или рамовске конструкције. За ову намену различити системи ојачања (положај и проценат ојачања) могу бити примењени сагласно критеријумима који указују на најбоље предности у смислу носивости, крутости и дуктилности. FRP ојачање може бити у форми трака, тканина или шипки, али и профила различитих облика.

Код дрвених елемената напрегнутих на савијање, иницијални лом настаје углавном у затегнутој зони у близини кврга, дефекта или на местима попречног наставка ламела код лепљених ламелираних елемената. Лом услед затезања дрвета изложеног савијању је крт, насумичан и тешко предвидив. Стога, дрвене греде (носачи)

се углавном ојачавају на затегнутој страни, чиме се повећава носивост и крутост на савијање, а зависно од процента ојачања, постиже знатно дуктилније понашање. FRP ојачање са својим високим капацитетом деформације омогућава притиснутим дрвеним влакнима да досегну дилатације пластичног течења, а затегнутим дрвеним влакнима да достигну њихов гранични капацитет носивости.

Шеме ојачања обухватају различит положај FRP композита у оквиру затегнуте зоне попречног пресека. Примена са спољашне стране пресека (слике 1а-г) је најчешћи случај ојачања постојећих конструкција. Овим начином ојачања могу се ефикасно премостити локални дефекти у дрвету. Постављање ојачања унутар пресека (слике 1д-ж), поред потешкоћа у извођењу, има неколико значајних предности као што су: већа отпорност при пожару, боља естетска својства, боља веза дрво-FRP композит (двострука површина лепљења) и мања могућност појаве деламинације. Идентичним распоредом FRP ојачања и у затегнутој и у притиснутој зони пресека постиже се максимално повећање крутости. Међутим за ниске проценте ојачања, повећање крутости расподелом ојачања између две стране пресека можда неће оправдати додатни материјал и рад при извођењу.

Ефикасност ојачања FRP материјалима може се побољшати преднапрезањем [26-28]. Шематски приказ поступка претходног напрезања једног носача од лепљеног ламелираног дрвета дат је

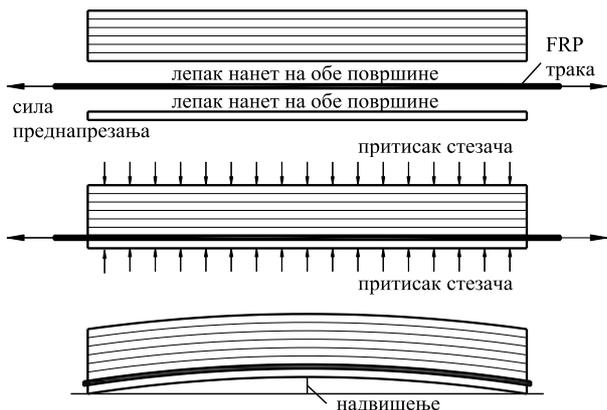


Слика 1. Примена FRP композита за ојачање дрвених елемената на савијање

на слици 2. Претходним затезањем FRP траке или шипке изазива се значајан напон притиска на доњој страни пресека, што је у супротности са напонима затезања услед спољашњих оптерећења. На овај начин повећава се носивост елемента на савијање. Преднапрезање, такође, утиче на деформације елемента. Ексцентрична сила преднапрезања изазива надвишење елемента, чиме се привидно повећава крутост на савијање. Међутим, овај начин ојачања тренутно нема велику примену у пракси због проблема у реализацији и недовољног познавања перформанси преднапрегнутих елемената кроз време.

#### 4.2. Ојачање на смицање

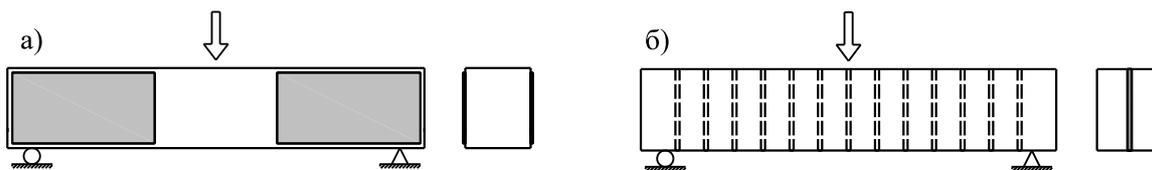
У већини случајева, напони савијања и деформације (угиби) су меродавни за димензионисање дрвених елемената изложених савијању. Међутим, код кратких греда, носача трапезастог облика или за одређене положаје оптерећења, смичући напони могу бити значајни, па је потребно извршити одговарајуће ојачање [29-31]. Поред тога, повећањем капацитета на савијање греде претходним ојачањем може се догодити да капацитет носивости на смицање буде прекорачен. У овом случају је неопходна комбинација ојачања на савијање и на смицање [32,33]. Постојеће методе за ојачавање на смицање елемената изложених савијању обухватају спољашње ојачање FRP тракама или тканинама на бочним странама (слика 3а) и унутрашње



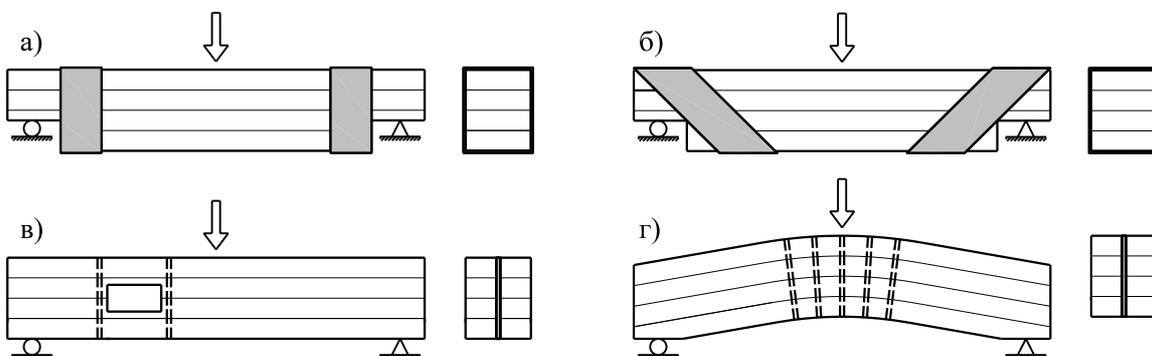
Слика 2. Шема поступка преднапрезања носача

ојачање у облику FRP шипке (слика 3б). Предност тканина у односу на траке је боља флексибилност приликом постављања и могућност прилагођавања елементима за које се повезују.

Генерално, код греда (носача) смичући напони достижу максималну вредност близу ослонаца. Лом услед смицања карактерише клизање влакана које резултује пуцањем у правцу влакана и сматра се кртим ломом. Овај лом је обично инициран појавом пукотина услед промена влажности дрвета. Ојачањем греде у областима високих смичућих напона код ослонаца води ка значајном повећању носивости на смицање и смањењу варијабилности. Ефекат ојачања FRP композитима зависи од његове крутости у правцу влакана дрвета. Употреба би-аксијалних тканина може бити корисна и за носивост и за крутост ојачане греде.



Слика 3. Примена FRP композита за ојачање дрвених елемената на смицање



Слика 4. Примена FRP композита за ојачање дрвених елемената на затезање управно на влакна

### 4.3. Ојачање на затезање управно на влакна

Чврстоћа дрвета на затезање управно на влакна је значајно нижа од чврстоће на затезање паралелно влакнима. Лом услед затезања управно на влакна може се јавити код дрвених носача у зонама редуковане висине пресека или око отвора, као и у слеменој зони трапезастих, закривљених и коленастих носача. Ојачање у критичној области може се постићи постављањем FRP композита са спољашње стране или унутар пресека носача. Спољашње ојачање подразумева пре свега лепљење FRP тканина, док унутрашње ојачање обухвата FRP шипке уграђене у рупе претходно испуњене лепком. Тканинама се обмотава елемент дуж пресека или се евентуално тканине постављају са обе бочне стране елемента тако да се протежу по целој висини пресека. Шипке се уграђују што ближе пресеку у коме се јављају велике вредности напона, обавезно водећи рачуна о минималним ивичним растојањима и међусобним размацима.

У случају носача са редукованом висином пресека код ослонаца (на крајевима), концентрација напона на месту нагле промене висине може довести до формирања хоризонталне пукотине. Иницијално отварање пукотине није могуће спречити ојачањем, али је могуће ограничити њен даљи развој и пропагацију. Према томе, ојачани носачи имају већу носивост и показују мање крт облик лома него што је то случај са неојачаним носачима [34,35].

Различите методе ојачања FRP тканинама су приказане на сликама 4а и 4б. Ојачање се може поставити управно или под углом од  $45^\circ$  у односу на подужну осу носача. Због присуства и смичућих напона поред напона затезања, ојачање под углом од  $45^\circ$  се показало као боље решење.

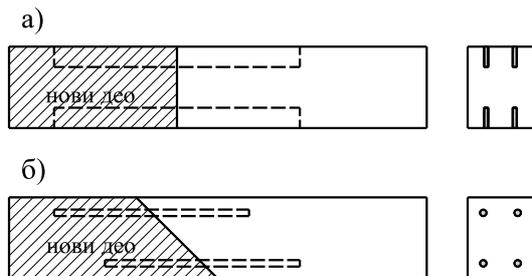
Код носача са отворима ојачање има за циљ да смањи концентрацију напона у угловима отвора [36]. Типична конфигурација ојачања FRP шипкама за носаче са отворима је приказана на слици 4в.

Као последица оштрог прелома закошене ивице носача и/или закривљености, у слеменој зони носача са променљивом висином или закривљеним обликом јављају се напони затезања управно на влакна. Ојачање управно на правац влакана води ка значајном повећању носивости у односу на неојачане носаче [37,38]. Примена FRP шипки као ојачања слемене зоне закривљеног носача је приказана на слици 4д.

#### 4.4. Санација крајева елемената

Дрво које је оштећено услед појаве гљивица или напада инсеката је порозно, крто и има веома слабу чврстоћу. Ова деградација се често дешава у локализованим деловима греде, као на пример на крајевима где је дрво у директном контакту са носећим зиданим зидовима. У овим случајевима, стање остатка греде је генерално добро. Оштећено место треба уклонити, а елемент треба надоградити како би функција носивости била очувана.

Метода санације подразумева замену оштећеног краја са новим дрвеним делом, који се повезује са здравим дрветом у оквиру постојећег елемента користећи FRP траке или шипке (слике 5а и 5б) [39-41]. Оштећени део греде се уклања резањем вертикално или под углом од  $45^\circ$  у односу на вертикалу. Нови део греде се обликује тако да одговара димензијама оштећеног дела.

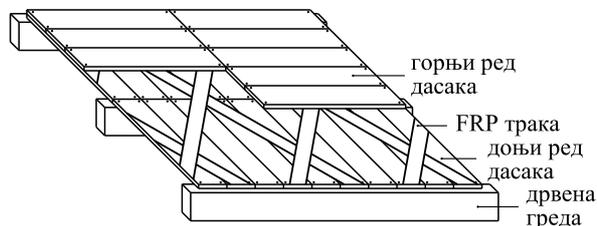


Слика 5. Санација оштећеног краја греде

Траке односно шипке се уграђују у претходно усечене жљебове/избушене рупе испуњене лепком у оквиру новог и постојећег дела. FRP ојачање употребљено као спојно средство треба да буде димензионисано да пренесе силе смицања и затезања које настају услед оптерећења.

#### 4.5. Ојачање у равни конструкције

FRP композитима се могу ојачати и конструкције изложене дејствима у својој равни. Типичан пример конструкција које захтевају ојачање у равни су традиционалне дрвене међуспратне конструкције [42]. Ове конструкције имају малу тежину, добру носивост на вертикално оптерећење, али ограничену крутост и ефикасност у преношењу хоризонталних сила у равни. У сеизмичком понашању објекта крутост међуспратне конструкције је веома важна, јер утиче на расподелу сеизмичке силе на вертикалне елементе конструкције. Крутост у равни дрвене међуспратне конструкције се лако може побољшати, без утицаја на масу и дебљину конструкције, постављањем на дашчану оплату или постојећу дрвену плочу дијагоналних укрућења од FRP трака или тканина, као што је приказано на слици 6.



Слика 6. Ојачање међуспратне конструкције у дејства у равни

Како би се понашање међуспратне конструкције у два главна правца учинило уједначенијим и како би се заштитио систем ојачања, односно побољшао квалитет споја, прикладно је да се изведе горња плоча од дасака усмерених управно на даске доње плоче (постојеће дашчане оплате). Описани метод интервенције не утиче значајно на крутост на савијање, нити на капацитет носивости међуспратне конструкције. Ове карактеристике треба посебно испитати и, ако је потребно, побољшати их раније описаним методама.

## 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ

### 5.1. Носачи од лепљеног ламелираног дрвета ојачани CFRP тракама

Експериментално истраживање је спроведено са циљем утврђивања могућности примене CFRP трака као ојачања носача од лепљеног ламелираног дрвета [43]. Шеме ојачања обухватиле су различит положај трака у оквиру затегнуте зоне попречног пресека. Десет носача ојачаних једном CFRP траком постављеном са спољашње стране пресека (Серија В) и пет носача ојачаних једном CFRP траком постављеном вертикално у претходно усечен прорез унутар пресека носача (Серија Е), као и осам контролних неојачаних носача (Серија А), испитано је на савијање до лома. Конфигурације тест серија су приказане на слици 7. У оквиру овог истраживања коришћене су CFRP траке (тзв. карбонске траке) швајцарског произвођача „Sika“, под ознаком Sika CarboDur S613 (ширина 60 mm и дебљина 1,3 mm). Sika CarboDur траке представљају полимере армиране карбонским влакнима са епоксидном матрицом. Реч је о монооксијалним тракама сачињеним од влакана која се пружају само у подужном правцу. Механичке карактеристике траке Sika CarboDur тип S дате су у табели 3.

Лепљени ламелирани дрвени носачи су произведени у фабрици фирме „Пирамида“ у Сремској Митровици. Носачи су израђени од четинарске грађе (смрека) класе чврстоће С24 према EN 338 [44]. Димензије носача износиле су 8×21×400 cm.

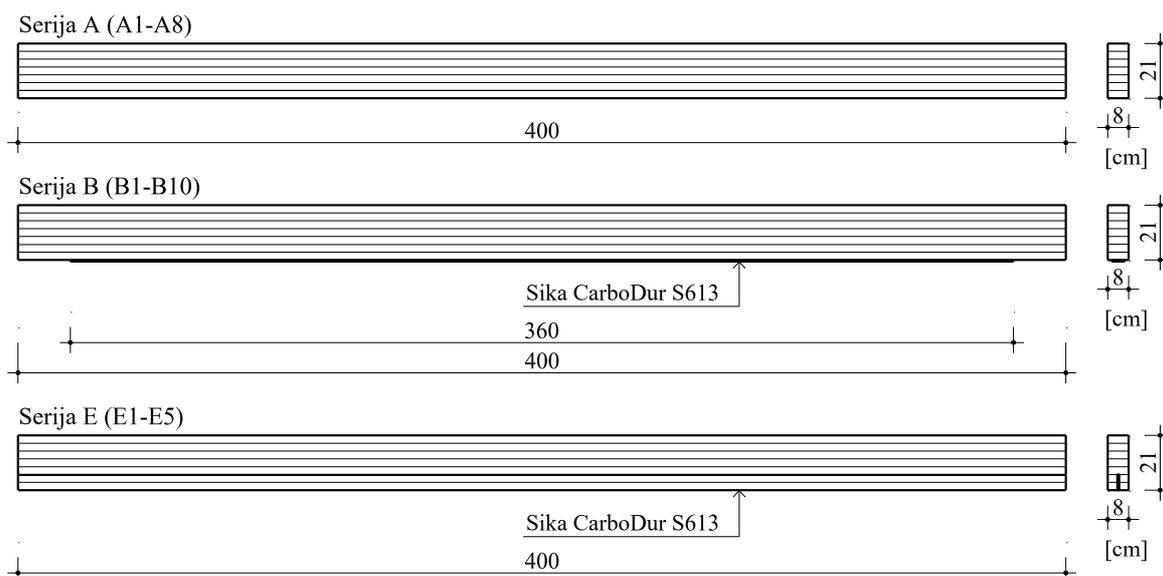
Табела 3. Механичке карактеристике CFRP траке (према техничком листу произвођача)

Карактеристика	Вредност
Чврстоћа на затезање	2800 МПа
Модул еластичности	165000 МПа
Истегање при лому	1,70%

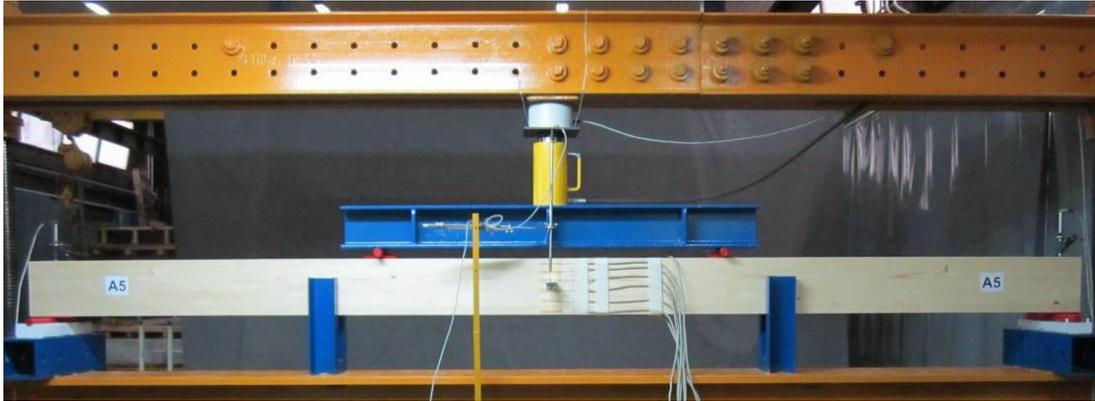
Сваки носач је формиран спајањем седам ламела, ширине 8 cm и дебљине 3 cm. Ламеле нису имале попречне наставке, већ су све биле из комада. У случају носача ојачаних вертикално постављеном карбонском траком унутар пресека, вертикални прорез за смештај ојачања је машински усечен након израде носача. Прорез је смештен у доњој зони, по средини пресека, дуж целе дужине носача, ширине 4 mm и дубине 62 mm. Величина прореза је усвојена да омогући смештање карбонске траке, са минимално потребном дебљином лепка са обе стране траке и са минималним слабљењем дрвета.

Повезивање карбонских трака за носаче остварено је помоћу епоксидних лепкова произвођача „Sika“. Sikadur-30 је коришћен за траке које су постављене са спољашње стране пресека носача, док је вискознији лепак Sikadur-330 употребљен за постављање трака унутар пресека носача. Како би се обезбедио квалитетан спој, ојачани носачи су чувани седам дана на собној температури  $20 \pm 2$  °C.

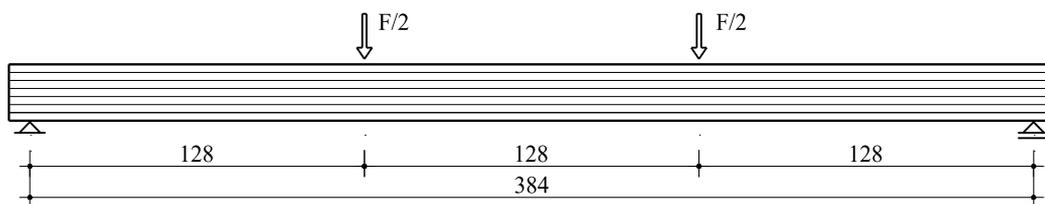
Експериментално испитивање је спроведено у Лабораторији за испитивање конструкција Грађевинског факултету у Београду. Сви носачи



Слика 7. Конфигурације испитаних серија носача



Слика 8. Носач у раму за испитивање



Слика 9. Диспозиција испитивања носача

испитани су на савијање као просте греде распона 378 cm ( $18 \times h$ , где је  $h$  висина носача) оптерећене концентрисаним силама у трећинама распона, у складу са EN 408 [45]. Испитивање неојачаних и ојачаних носача извршено је у затвореном челичном раму. Положај једног носача у раму за испитивање приказан је на слици 8, док је шематски приказ диспозиције испитивања дат на слици 9. Оптерећење је аплицирано путем хидрауличке пресе и јаког челичног профила, а мерено је помоћу дозне. Слободно ослањање носача омогућено је применом ваљкастих челичних лежаја. Такође, ваљкасти лежаји коришћени су на местима наношења оптерећења, како би се обезбедило „чисто“ вертикално оптерећење. На местима наношења оптерећења и ослањања постављене су челичне плочице са циљем да умање локална оштећења (гњечење) дрвета.

Бочна укрућења су предвиђена да спрече евентуално извијање носача. Угиб носача у односу на ослонце мерен је помоћу индуктивних угибомера. Мерним тракама у средини распона мерене су дилатације по висини носача. Прикупљање мерних података је спроведено помоћу аквизиционог система.

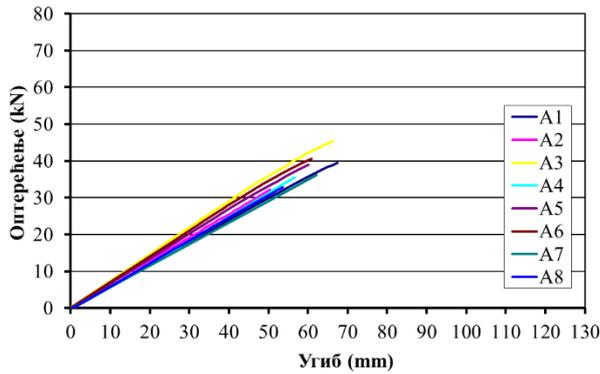
Понашање носача је описано кроз дијаграме оптерећење-угиб, облике лома, капацитет носивости и деформабилности, као и вредности крутости на савијање. Вредности максималног оптерећења и угиба су очитани из прикупљених експерименталних резултата. Крутост на савија-

ње је срачуната на основу нагиба кривих оптерећење-угиб, за област између  $0,1 \times F_{\max}$  и  $0,4 \times F_{\max}$  где је понашање носача линеарно-еластично, при чему  $F_{\max}$  представља максимално оптерећење.

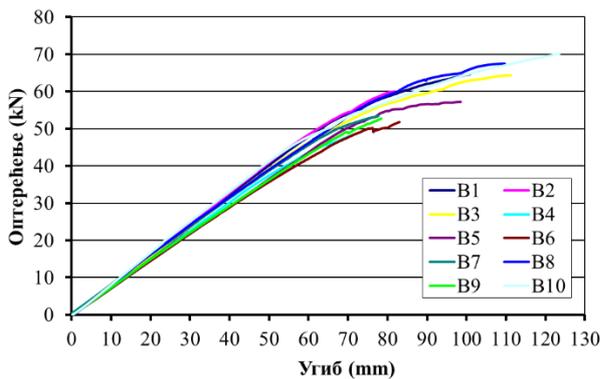
Дијаграми оптерећење-угиб до лома неојачаних носача (Серија А) приказани су на слици 10а. Неојачани носачи су показали прилично линеарно-еластично понашање до лома.

Колапс свих неојачаних носача десио се услед иницијалног лома у затегнутом делу носача. Као последица кртог понашања дрвета при затезању, лом се догодио изненада, без икаквих назнака пре достизања граничног оптерећења. Код четири од пет испитаних узорака лом је инициран на местима грешака грађе дрвета (кврге) у области максималног момента савијања, између тачака аплицирања оптерећења (слика 11а). Сваку локалну зону око дефекта карактерише изразита закошеност дрвених влакана, што води ка високој компоненти напона затезања управно на влакна. Као резултат овог напрезања јављају се изражене подужне пукотине, које се у неким случајевима пружају готово до ослонаца. Код једног од пет носача лом се догодио по чистом дрвету у ивичној ламели затегнуте зоне. Ни у једном од неојачаних носача није било трагова пластификације на ламелама у притиснутој зони.

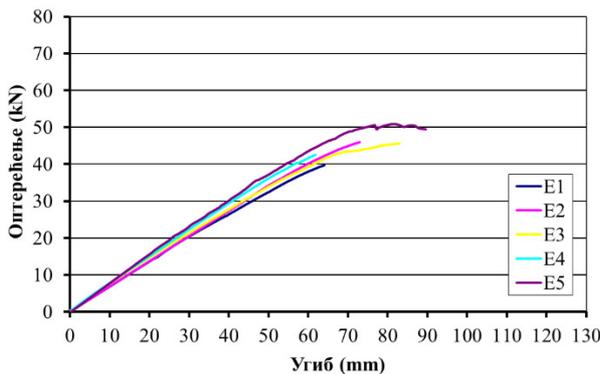
Приказ експерименталних резултата у смислу максималног оптерећења, угиба у средини носача при лому и крутости на савијање за неојачане



а) Неојачани носачи Серије А



б) Ојачани носачи Серије В



в) Ојачани носачи Серије Е

Слика 10. Дијаграми оптерећење-угиб за испитане серије носаче

носаче Серије А дат је у табели 4. Средња вредност граничног оптерећења за неојачане (контролне) узорке била је 37,9 кН, са коефицијентом варијације 12,1%. Велика разлика између најнижег и највишег оптерећења показује велику варијабилност у чврстоћи дрвета. Будући да је дрво природни материјал ови резултати су очекивани. Средња вредност угиба у средини при максималној сили износила је 59,9 мм, са коефицијентом варијације од 10,0%. С обзиром да су неојачани носачи остали у линеарно-еластичној области понашања, резултати мерења угиба су у линеарној зависности са резултатима мерења оптерећења. Средња вредност крутости

на савијање неојачаних носача је износила  $6,46 \times 10^{11}$  Nmm<sup>2</sup>. Коефицијент варијације у случају крутости је знатно мањи него у случају оптерећења и угиба, и износи 7,7%. Узимајући да су сви носачи израђени од ламела исте класе чврстоће дрвета, забележени коефицијент варијације је висок.

Носачи ојачани једном карбонском траком на доњој (затегнутој) страни (Серија В) показали су дуктилније понашање у односу на неојачане носаче, што се може видети на слици 10б. Понашање оптерећење-угиб ових носача је линеарно-еластично до појаве локалног оштећења изазваног присуством дефеката и дисконтинуитета дрвета у затегнутој зони. Пластично течење дрвета је изазивало одређено нелинеарно понашање.

Најчешћи механизам колапса ојачаних носача Серије В је лом изазван затезањем, са или без делимичне пластификације притиснуте зоне носача. Резултати испитивања су показали да се код седам од десет испитаних носача иницијални лом догодио у затегнутим ламелама на месту кврга у дрвету (слика 11б), док се код два носача лом догодио по чистом дрвету у ивичној ламели затегнуте стране носача. Присуство подужних пукотина после иницијалног лома изазваног затезањем забележено је код већине носача. Код два носача код којих је лом инициран на месту кврга на затегнутој страни, у области аплицираних сила, забележено је смицање као секундарни облик лома. Лом изазван чисто смицањем десио се код једног носача. У већини случајева, лом изазван достизањем граничне чврстоће дрвета у затегнутој зони је био експлозивне природе, што је проузроковало одвајање и делимично пуцање карбонске траке. Остварена адхезија између дрвета и карбонске траке нарушена је једино после лома у дрвету.

Присуство хоризонтално постављене карбонске траке на затегнутој страни носача спречава отварање пукотина, ограничава локална оштећења и премошћава локалне дефекте у дрвету и на тај начин омогућава знатно дуктилније понашање ојачаних носача. Степен дуктилности носача у многоме зависи од квалитета дрвених ламела у доњој (затегнутој) зони и што су квалитетније ламеле смештене непосредно изнад карбонске траке то је дуктилност већа.

Дијаграми оптерећење-угиб на слици 10в показују у суштини линеарно понашање до лома носача ојачаних вертикално постављеном карбонском траком унутар пресека (Серија Е). Лом носача Серије Е изазван је појавом пукотина у

затегнутој зони, пре појаве пластичног течења у притиснутој зони. Позитивни ефекти услед присуства карбонске траке нису довољни да умање утицај оштећења и дефекта у дрвету. Поред тога, подужним пререзом за смештај карбонске траке дошло је до ремећења дрвених влакана у зони усецања чиме је додатно ослабљен носач. Код четири од пет испитаних носача колапс је настао ломом дрвеног пресека са леве или десне стране карбонске траке, у оквиру средње трећине распона носача (слика 11в). Резултати су показали да је лом код три узорка инициран присуством дефеката дрвета (кврге, смолни цеп), док се лом једног узорка догодио по чистом дрвету. Лом једног носача настао је услед смицања у хоризонталној равни непосредно изнад вертикално постављене карбонске траке. Приањање између

ојачања и дрвета је било ефикасно до лома носача. Одвајање карбонске траке од дрвета, а у неким случајевима и гужвање, догађало се једино после лома у дрвету.

Резултати експерименталног испитивања носача ојачаних карбонским тракама (Серија В и Серија Е) у смислу максималног оптерећења, угиба у средини носача при лому и крутости на савијање дати су у табели 4. Примена ојачања у виду карбонских трака допринела је побољшања носивости, деформабилности и крутости у односу на неојачане носаче. Капацитет носивости ојачаних носача условљен је обликом лома, присуством имперфекција у осетљивој зони, као и положајем ојачања.



а) Неојачани носачи Серије А (носач А2 и носач А4)



б) Ојачани носачи Серије В (носач В4 и носач В9)



в) Ојачани носачи Серије Е (носач Е1 и носач Е4)

Слика 11. Карактеристични облици лома испитаних серија носача

Табела 4. Преглед резултата експерименталног испитивања носача

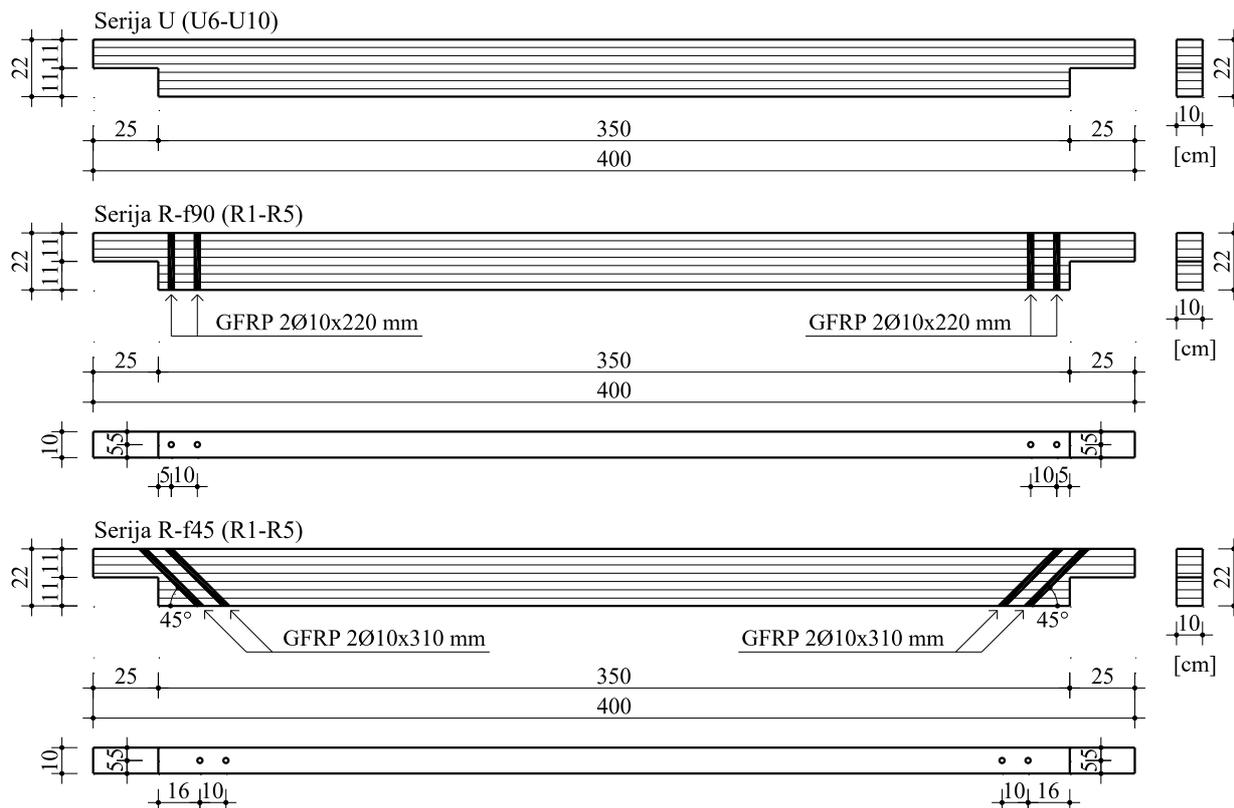
Тест серија	Средња вредност	Минимална вредност	Максимална вредност	Стандардна девијација	Коефицијент варијације (%)
Максимално оптерећење (kN)					
A	37,9	32,3	45,4	4,6	12,1
B	59,1	48,4	70,1	7,3	12,4
E	45,0	39,8	50,8	4,1	9,2
Угиб у средини при лому (mm)					
A	59,9	50,5	66,7	6,0	10,0
B	93,8	71,0	123,5	17,4	18,6
E	74,4	61,9	89,6	11,9	16,0
Крутост на савијање EI ( $\times 10^{11}$ Nmm <sup>2</sup> )					
A	6,46	5,88	7,29	0,50	7,7
B	7,73	7,20	8,31	0,38	4,9
E	7,18	6,82	7,77	0,39	5,5

Испитивање спроведено на носачима ојачаним једном карбонском траком са доње стране показало је средњу вредност граничног оптерећења за десет узорака Серије В од 59,1 kN, са коефицијентом варијације 12,4%. Средња вредност граничног оптерећења за пет узорака Серије Е, ојачаних вертикално постављеном карбонском траком, износила је 45,0 kN, при чему је коефицијент варијације износио 9,2%. Када се прави поређење са неојачаним носачима, колапс ојачаних носача догодио се при знатно већим оптерећењима. Носачи са ојачањем постављеним хоризонтално имали су већу носивост у односу на оне са вертикално постављеним ојачањем. Повећање капацитета носивости носача Серије В у односу на неојачане носаче (Серија А) било је 56,0%, што је три пута више него што је добијено за носаче серије Е (18,6%). Хоризонтално постављена трака делује као мост преко дефеката и на тај начин омогућава да се својства конструкцијског дрвета приближе својствима дрвета добијеним испитивањем на малим „чистим“ узорцима. Поред наведене анализе резултата, занимљив је податак да су од свих ојачаних носача два носача из Серија Е (Е1, Е2) имала мање гранично оптерећење од „најјачег“ неојачаног носача (А3). Свакако, ово није поуздан показатељ ефикасности ојачања јер је лом носача углавном условљен дефектима у дрвету. Увођење ојачања није значајно смањило варијацију резултата граничног оптерећења. Разлог лежи у чињеници да је лом најчешће изазван затезањем.

Носачи ојачани карбонским тракама су имали веће деформације пре лома у поређењу са неојачаним. Средња вредност угиба у средини износила је 93,8 mm за носаче Серије В, са

коефицијентом варијације 18,6%. Средња вредност угиба у средини износила је 74,4 mm за носаче Серије Е, са коефицијентом варијације 24,1%. Повећање средње вредности угиба у средини носача при лому у односу на неојачане носаче било је 69,4% (Серија В) и 24,1% (Серија Е). На основу овога може се рећи да су траке допринеле бољем искоришћењу карактеристика пресека носача. Висок коефицијент варијације код серија ојачаних носача је последица велике варијабилности својстава дрвета као материјала, посебно у нелинеарној области понашања.

На основу испитивања спроведених на носачима ојачаним једном карбонском траком са доње (спољашње) стране (Серија В), утврђена је средња вредност крутости  $7,73 \times 10^{11}$  Nmm<sup>2</sup>, са коефицијентом варијације 4,9%. Средња вредност крутости за носаче ојачане вертикално постављеном карбонском траком (Серија Е), износила је  $7,18 \times 10^{11}$  Nmm<sup>2</sup>, при чему је коефицијент варијације био 5,5%. Увођење у попречни пресек материјала са великом крутошћу, какав су карбонске траке, резултовало је повећањем крутости на савијање носача. Очекивано, носачи са ојачањем постављеним хоризонтално са спољашње стране пресека показали су већу крутост у односу на носаче са вертикално постављеним ојачањем унутар пресека. Разлог лежи у положају тежишта ојачања у односу на неутралну осу пресека. Повећање крутости носача Серије В, ојачаних карбонском траком са доње (затегнуте) стране, у односу на контролне носаче (Серија А) износило је 19,5%. Постављање карбонске траке унутар пресека у вертикалном положају водило је ка повећању крутости (11,1%), али је то повећање за 1,75 пута мање у односу на носаче Серије В. Утицај природе



Слика 12. Конфигурације испитаних серија носача

дрвета на крутост може се најбоље видети кроз следећи пример: неојачани носач А3 имао је већу крутост него ојачани носачи В6, Е1, Е2 и Е4. Ојачавањем носача варијабилност резултата крутости је умањена. Ово може бити резултат израженог утицаја карбонских трака, производа са високом контролом квалитета и малом варијабилношћу механичких својстава.

## 5.2. Носачи од лепљеног ламелираног дрвета са редукованом висином ојачани GFRP шипкама

Експериментално истраживање је спроведено са циљем процене ефеката ојачања GFRP шипкама у зони редуковане висине пресека носача од лепљеног ламелираног дрвета изложених савијању [46]. Експериментални програм је обухватио испитивање неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека код ослонаца. Неојачани носачи су послужили као репер за процену ефикасности интервенције Испитано је укупно 15 носача – пет неојачаних (Серија U), пет ојачаних двома GFRP шипкама постављеним под углом од  $90^\circ$  у односу на подужну осу носача (Серија R-f90) и пет ојачаних двома GFRP шипкама постављеним под углом од  $45^\circ$  у односу на подужну осу носача (Серија R-f45). Конфигурације тест серија су приказане на

слици 12. У оквиру овог истраживања коришћене су GFRP шипке (тзв. Сталкопластична арматура) произвођача „Композитна арматура“ из Крагујевца. Реч је о ребрастим шипкама сачињеним од стаклених влакана и епоксидне смоле као матрице. Механичке карактеристике коришћених GFRP шипки дате су табели 5.

Табела 5. Механичке карактеристике GFRP шипке (према техничком листу произвођача)

Карактеристика	Вредност
Чврстоћа на затезање	1100 МПа
Модул еластичности	55000 МПа
Истегање при лому	2,00%

Лепљени ламелирани дрвени носачи су произведени у фабрици фирме „Пирамида“ у Сремској Митровици. Носачи су израђени од четинарске грађе (смрека) класе чврстоће C22 према EN 338 [44]. Димензије носача износиле су  $10 \times 22 \times 400$  cm. На крајевима носача (зоне ослонаца), на сегментима дужине 25 cm, висина пресека је редукована на пола (на 11 cm). Сваки носач је формиран спајањем седам ламела, ширине 10 cm и дебљине 32 mm. Рупе за средства за ојачање су избушене након израде носача. Будући да су за ојачања коришћене

шипке пречника  $\varnothing 10$  mm, предвиђено је да рупе буду пречника  $\varnothing 14$  mm. На овај начин је остављено довољно простора за слој лепка, чиме се обезбеђује добра адхезија између шипке и лепка, као и лепка и дрвета. Минимални размаци и минимална ивична растојања за шипке су усвојени у складу са правилима за штапаста спојна средства датим у Еврокоду 5.

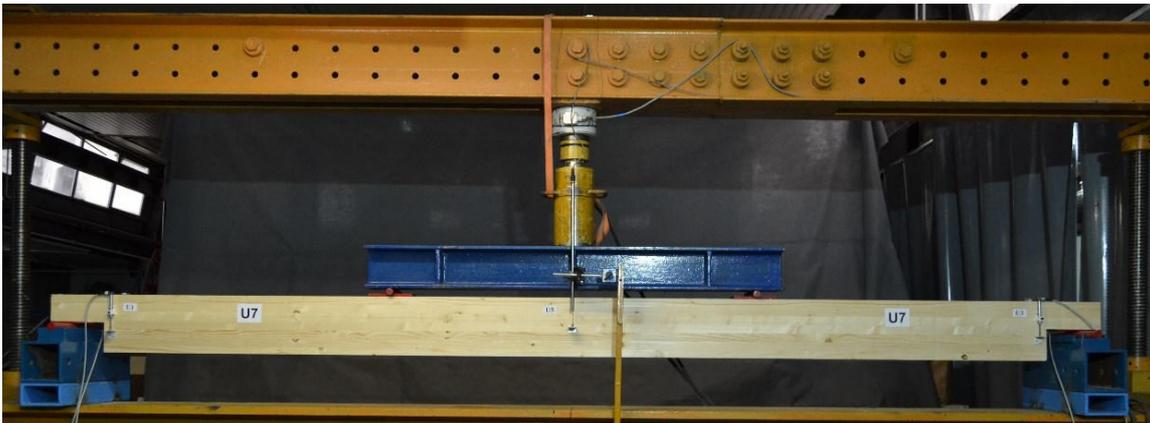
За постављање шипки унутар пресека носача коришћен је епоксидни лепак Sikadur-30, швајцарског произвођача „Sika“ Овај лепак је изабран због компатибилности са примењеним GFRP шипкама, као и због његових добрих физичких и механичких својстава. По завршетку поступка ојачања, носачи су остављени да одстоје 7 дана на температури од  $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$  како би лепак постигао потребну чврстоћу.

Експериментално испитивање је спроведено у Лабораторији за испитивање конструкција Грађевинског факултету у Београду. Сви носачи су испитани на савијање као просте греде распона 375 cm, што одговара захтеву стандарда EN 408 [45] ( $18 \times h \pm 3 \times h$ , где је  $h$  висина попречног пресека носача). Ослонци су постављени на 12,5 cm од крајева носача, тј. у средини дужине дела са редукованом висином пресека. Носачи су оптерећени приближно у трећинама распона, при овоме се водило рачуна да растојање између концентрисаних сила буде  $6h$ ,

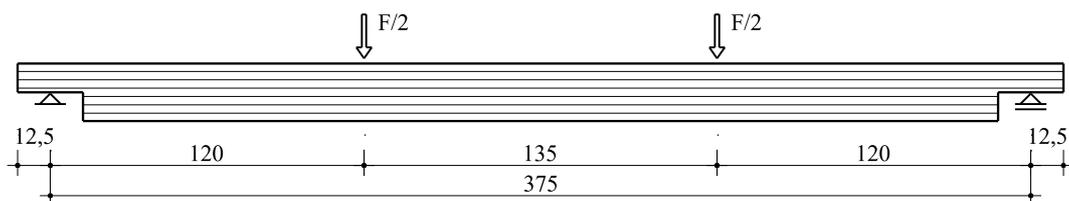
што одговара усвојеном растојању од 135 cm. Експериментално испитивање носача са редукованом висином је извршено по истом поступку као у случају носача са константном висином (део 5.1). Сходно очекиваном понашању носача, нису мерене дилатације у средини распона, већ је мерено размицања тачака на местима редукције висине пресека, где извесно долази до отварања пукотина. Ова мерења су спроведена обострано са по два индуктивна угибомера. Положај једног носача у раму за испитивање је приказан на слици 13, док је шематски приказ диспозиције испитивања дат на слици 14.

Понашање носача је описано кроз дијаграме оптерећење-угиб, облике лома, капацитет носивости и деформабилности, као и вредности крутости на савијање. Вредности максималног оптерећења и угиба су очитани из прикупљених експерименталних резултата. Крутост на савијање је срачуната на основу нагиба кривих оптерећење-угиб за област линеарно-еластично понашања носача ( $0,1-0,4 \times F_{\max}$ , при чему је  $F_{\max}$  максимално оптерећење).

Неојачани носачи су показали линеарно-еластично понашање до лома, што се може јасно видети са дијаграма оптерећење-угиб приказаним на слици 15а. Лом неојачаних носача је био крте природе и наступио је нагло, без претходних упозорења. Услед прекорачења чврстоће на

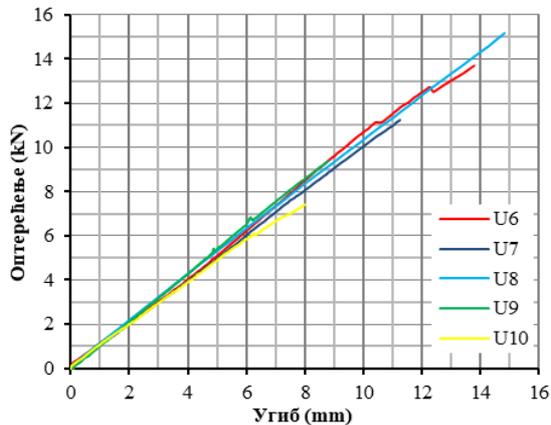


Слика 13. Носач у раму за испитивање

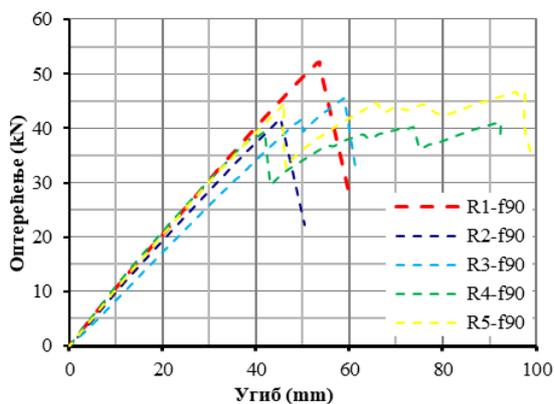


Слика 14. Диспозиција испитивања носача

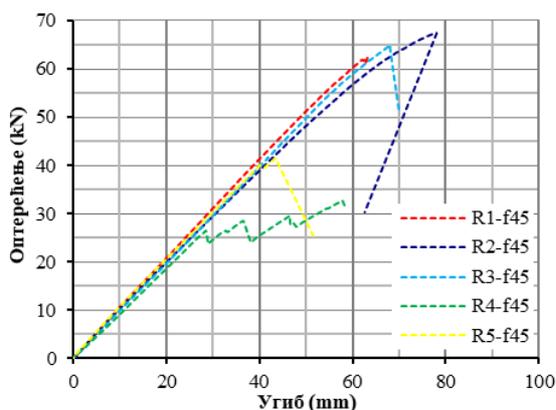
затезање управно на влакна на местима редукције висине пресека догодило се отварање пукотине. Након отварања пукотине код свих носача ове серије дошло је до њеног неконтролисаног раста и смичућег лома (слика 16а). Код појединих неојачаних носача пукотина се пружала скоро до половине дужине носача, чиме је практично дошло до поделе носача на два дела.



а) Неојачани носачи Серије U



б) Ојачани носачи Серије R-f90



в) Ојачани носачи Серије R-f45

Слика 15. Дијаграми оптерећење-угиб за испитане серије носаче

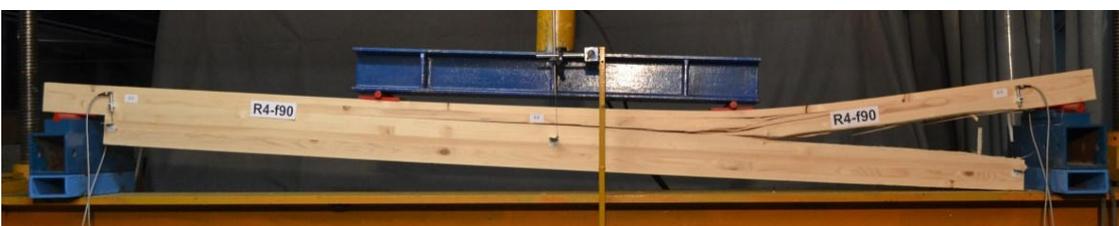
Пућања пукотине је углавном била праволинијска, а површине пукотине равне. Ни у једном случају није дошло до пружања пукотине по споју између ламела, што говори о добром квалитету произведених носача.

Приказ експерименталних резултата у смислу максималног оптерећења, угиба у средини носача при лому и крутости на савијање за неојачане носаче Серије U дат је у табели 6. Средња вредност максималног оптерећења у случају неојачаних носача износила је 12,8 kN. Мала вредност граничног оптерећења је последица присуства редукције висине пресека код ослонаца, што је довело до знатног смањења капацитета носивости носача. Изузетно велики коефицијент варијације од 25,2% је резултат како варијабилности карактеристика дрвета као материјала, тако и непредвидивости лома иницираног отварањем пукотине. Код носача од дрвета ова вредност коефицијента варијације је очекивана, посебно у случају појаве лома услед напрезања као што је затезање управно на влакна. Средња вредност угиба у средини при максималној сили износила је 11,5 mm, са коефицијентом варијације од 26,6%. С обзиром да су неојачани носачи остали у линеарно-еластичној области понашања, резултати мерења угиба су у линеарној зависности са резултатима мерења оптерећења. Средња вредност крутости на савијање носача Серије U је износила  $9,19 \times 10^{11}$  Nmm<sup>2</sup>. Коефицијент варијације у случају крутости је знатно мањи него у случају оптерећења и угиба, и износи 5,8%. Нижа вредност коефицијента варијације је резултат израде свих носача од ламела исте класе чврстоће дрвета.

Носачи ојачани са две GFRP шипке постављене вертикално једна иза друге дуж подужне осе носача (Серија R-f90) показали су дуктилније понашање у односу на неојачане носаче, што се може видети на дијаграмима оптерећење-угиб приказаним на слици 15б. Присуство GFRP шипки утицало је на то да се механизам лома ојачаних носача Серије R-f90 значајно разликује у односу на неојачане носаче. У случају носача R1-f90, R2-f90 и R3-f90 лом се догодио услед савијања, у доњој затегнутој зони, док се у случају носача R4-f90 и R5-f90 лом догодио услед смицања (слика 16б). Дакле, код три од пет носача је облик лома промењен из комбинованог, услед затезања управно на влакна и смицања, у лом услед савијања. Лом код ових носача је претежно инициран на местима дефеката и кврга у дрвету. Није забележена појава пластификације притиснутих влакана дрвета



а) Неојачани носачи Серије U (носач U6)



б) Ојачани носачи Серије R-f90 (носач R3-f90 и носач R4-f90)



в) Ојачани носачи Серије R-f45 (носач R3-f45 и носач R5-f45)

Слика 16. Карактеристични облици лома испитаних серија носача

у горњој зони пресека. Код свих носача ојачаних GFRP шипкама је долазило до иницирања пукотина на местима нагле промене висине, али су шипке успешно спречиле њихово прекомерно отварање до достизања граничног оптерећења. У случају носача чији је лом настао услед смицања, дошло је до неконтролисаног раста пукотине, као и потпуног извлачења шипки непосредно пре наступања коначног лома носача. Скоковите промене забележене на приказаним дијаграмима оптерећење-угиб одговарају постепеном извлачењу GFRP ојачања, те се може рећи да је лом на неки начин био најављен.

Дијаграми оптерећење-угиб на слици 15в показују у суштини линеарно понашање до лома носача ојачаних са две GFRP шипке постављене косо (под углом од  $45^\circ$ ) једна иза друге дуж подужне осе носача (Серија R-f45). Као и код ојачаних носача Серије R-f90, примена GFRP шипки утицала је на облик лома ојачаних носача Серије R-f45. У случају носача R1-f45, R2-f45 и R3-f45 забележен је лом услед смицања, док је носач R5-f45 достигао лом услед савијања, у доњој затегнутој зони (слика 16в). Лом овог носача је инициран на месту кврге у дрвету. Код носача R4-f45 догодио се најпре локални лом

узрокован савијањем услед затезања у доњој зони пресека, после чега је носач наставио да носи оптерећење до коначног лома услед смицања. Слично као код носача Серије R-f90, код ојачаних носача Серије R-f45 долазило је до иницирања пукотина на местима нагле промене висине, али су шипке успешно спречавале њихово прекомерно отварање. У случају носача код којих се лом десио услед смицања, дошло је до неконтролисаног раста пукотине и извлачења шипки непосредно пре коначног лома.

Резултати експерименталног испитивања носача ојачаних GFRP шипкама (Серија R-f90 и Серија R-f45) у смислу максималног оптерећења, угиба у средини носача при лому и крутости на савијње дати су у табели 6. Примена ојачања у виду GFRP шипки допринела је значајном побољшању носивости и деформабилности ојачаних у односу на неојачане носаче.

Носачи Серије R-f90, ојачани са по две GFRP шипке вертикално постављене једна иза друге, су имали просечно оптерећење при лому од 45,5 kN, са коефицијентом варијације од 9,7%. Носачи Серије R-f45, ојачани са по две GFRP шипке косо постављене једна иза друге, су имали просечно оптерећење при лому од 53,9 kN, са коефицијентом варијације од 29,0%. Сви носачи ојачани GFRP шипкама су достигли веће гранично оптерећење у поређењу са граничним оптерећењем носача без ојачања. Забележено повећање је износило 3,6 пута у случају носача Серије R-f90, односно 4,2 пута у случају носача Серије R-f45. Ојачањем GFRP шипкама могуће је постићи лом услед савијања, уз достизање носивости која је очекивана за носаче константног попречног пресека, без редукције висине код ослонаца. Осим повећања носивости, може се

уочити и мање расипање резултата максималног оптерећења код ојачаних серија носача у односу на серију неојачаних носача. Применом GFRP шипки је генерално ублажена варијабилност у понашању дрвених носача као последица редукције висине пресека. Нешто већа вредност коефицијента варијације забележена код носача Серије R-f45 последица је прераног лома једног носача (R4-f45).

Носачи ојачани GFRP шипкама су достигли веће деформације у тренутку појаве лома у поређењу са неојачаним носачима. Средња вредност угиба у средини при лому износила је 69,1 mm за носаче Серије R-f90, са коефицијентом варијације 33,5%. Средња вредност угиба у средини при лому износила је 62,1 mm за носаче Серије R-f45, са коефицијентом варијације 20,5%. Ојачање GFRP шипкама је омогућило носачима да наставе да носе оптерећење након иницијалног отварања пукотине, што је довело до повећања угиба у средини при лому 4,4-6,0 пута у поређењу са неојачаним носачима. На основу овога може се рећи да су шипке допринеле бољем искоришћењу карактеристика пресека носача. Висок коефицијент варијације код серија ојачаних носача је последица велике варијабилности карактеристика дрвета као материјала

Носачи са две вертикално постављене GFRP шипке (Серија R-f90) су имали просечну крутост на савијање  $9,04 \times 10^{11}$  Nmm<sup>2</sup>, док су носачи са две косо постављене GFRP шипке (Серија R-f45) имали просечну крутост на савијање  $9,0 \times 10^{11}$  Nmm<sup>2</sup>. С обзиром да је примењено ојачање локалног карактера (у зони ослонаца), очекивано није дошло до повећања крутости на савијање у односу на неојачане носаче (Серија U).

Табела 6. Преглед резултата експерименталног испитивања носача

Тест серија	Средња вредност	Минимална вредност	Максимална вредност	Стандардна девијација	Коефицијент варијације (%)
Максимално оптерећење (kN)					
U	12,8	8,7	16,7	3,2	25,2
R-f90	45,5	41,1	52,1	4,4	9,7
R-f45	53,9	32,8	67,4	15,6	29,0
Угиб у средини при лому (mm)					
U	11,5	8,0	15,1	3,1	26,6
R-f90	69,1	45,3	95,5	23,2	33,5
R-f45	62,1	43,5	77,8	12,7	20,5
Крутост на савијање EI ( $\times 10^{11}$ Nmm <sup>2</sup> )					
U	9,19	8,60	9,91	0,53	5,8
R-f90	9,04	8,00	9,76	0,65	7,2
R-f45	9,00	8,44	9,40	0,38	4,3

## 6. ЗАКЉУЧАК

Примена FRP композитних материјала представља повољно решење за ојачање (санацију) дрвених конструкција. Поред своје једноставности, ова техника обезбеђује значајно побољшање носивости и крутости ојачаних конструкцијских елемената. Осим тога, чини дрвену конструкцију знатно поузданијом. Присуство композитних ојачања спречава отварање пукотина, ограничава локална оштећења и премошћава локалне дефекте у дрвету. Ова преимућства омогућавају примену дрвета као грађевинског материјала изван његових тренутних ограничења.

Успешна примена FRP композитних материјала и дрвета у великој мери зависи од различитих фактора. То укључује компатибилност између материјала ојачања и материјала који се ојачава, као и остварени квалитет лепљеног споја два материјала. Тренутно обећавајући резултати испитивања ојачаних дрвених конструкција углавном су засновани на краткотрајним експерименталним истраживањима. Међутим, основна питања везана за процесе старења, временски зависна својства при различитим условима средине и механизме детериорације нису довољно истражена. Постоји потреба за будућим радом на процени понашања спрегнутог система дрво-FRP, укључујући и лепљени спој, за утицај влаге, температуре, пожара и других услова средине, као и под заједничким дејством различитих утицаја и условима механичког оптерећења.

Недостатак утврђених прорачунских правила врло ограничава употребу FRP ојачања у многим ситуацијама. Док су неке државе развиле националне смернице, тренутно не постоји европски стандард који специфицира прорачун FRP конструкција или FRP ојачања за дрвене, челичне, зидане или бетонске конструкције. Дакле, да би овај метод ојачања био практичан за свакодневну примену потребно је дефинисати реалне прорачунске моделе за различите врсте напрезања, утврдити прорачунске вредности својстава материјала и усвојити одговарајуће корекционе коефицијенте за различите прорачунске ситуације.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] S. Franke, B. Franke, A. Harte. Failure modes and reinforcement techniques for timber beams - State

of the art. *Construction and Building Materials*, 97, 2015, 2-13.

- [2] M. Muravljov. *Praktična primena Sika karbonskih traka u ojačanju betonskih konstrukcija*. Sika Srbija doo, Beograd, 2015.
- [3] M. Muravljov. *Osnovni aspekti primene kompozitne GFRP armature*. Kompozit Armatura doo, Beograd, 2016.
- [4] CNR-DT 201/2005: *Guidelines for design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures - Timber structures*. Italian National Research Council, Rome, Italy, 2007.
- [5] B. Kasal, L. Yan. *Fibre-reinforced polymers as reinforcement for timber structural elements*. In: *Reinforcement of timber elements in existing structures*, J. Branco, P. Dietsch, T. Tannert (eds), State-of-the-Art Report of the RILEM TC 245-RTE, Springer, 2021, 51-78
- [6] K. U. Schober, A. Harte, R. Kliger, R. Jockwer, Q. Xu, J. F. Chen. *FRP reinforcement of timber structures*. In: *Reinforcement of timber structures*, A. Harte, P. Dietsch, (eds), State-of-the-Art Report of COST Action FP1101, Shaker Verlag 2015, 183-208.
- [7] H. Estrada, L. Lee. *FRP composite constituent materials*. In: *The international handbook of FRP composite in civil engineering*, M. Zoghi (ed), CRC Press, 2014, 31-49.
- [8] CNR-DT 200 R1/2013: *Guidelines for design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures - Materials, RC and PC structures, masonry structures*. Italian National Research Council, Rome, Italy, 2014.
- [9] A. Andre. *Fibres for strengthening of timber structures*. Technical report, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 2006.
- [10] L. Yan, B. Kasal, L. Huang. *A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering*. *Composites Part B*, 92, 2016, 94-132.
- [11] C. Gentile, D. Svecova, S. H. Rizkalla. *Timber beams strengthened with GFRP bars: development and applications*. *Journal of Composites for Construction*, 6, 2002, 11-20.
- [12] A. Borri, M. Corradi, A. Grazini. *A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials*. *Composites: Part B*, 36, 2005, 143-153.
- [13] F. Micelli, V. Scialpi, A. La Tegola. *Flexural reinforcement of glulam timber beams and joints with carbon fiber reinforced polymer rods*. *Journal of Composites for Construction*, 9, 2005, 337-347.
- [14] K. U. Schober, K. Rautenstrauch, 2007. *Post-strengthening of timber structures with CFRP's*. *Materials and Structures*, 40, 2007, 27-35.
- [15] G. Raftery, A. Harte. *Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate*. *Composites: Part B*, 42, 2011, 724-735.

- [16] H. Alhayek, D. Svecova. Flexural stiffness and strength of GFRP-reinforced timber beams. *Journal of Composites for Construction*, 16, 2012, 245-252.
- [17] T. Nowak, J. Jasienko, D. Czepizak. Experimental tests and numerical analysis of historic bent timber elements reinforced with CFRP strips. *Construction and Building Materials*, 40, 2013, 197-206.
- [18] A. Borri, M. Corradi, E. Speranzini. 2013. Reinforcement of wood with natural fibers, *Composites: Part B*, 53, 2013, 1-8.
- [19] G. P. de la Rosa, E. A. Cobo, G. M. N. Gonzalez. Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials. *Composites: Part B*, 55, 2013, 528-536.
- [20] A. D'Ambrisi, F. Focacci, R. Luciano. Experimental investigation on flexural behavior of timber beams repaired with CFRP plates. *Composite Structures* 108, 2014, 720-728.
- [21] G. Raftery, C. Whelan. Low-grade glued laminated timber beams reinforced using improved arrangements of bonded-in GFRP rods. *Construction and Building Materials*, 52, 2014, 209-220.
- [22] G. Raftery, F. Kelly. Basalt FRP rods for reinforcement and repair of timber, *Composites: Part B*, 70, 2015, 9-19.
- [23] H. Yang, W. Liu, W. Lu, S. Zhu, Q. Geng. Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: Experimental and theoretical evaluation. *Construction and Building Materials*, 106, 2016, 550-563.
- [24] M. Corradi, A. Borri, L. Righetti, E. Speranzini. Uncertainty analysis of FRP reinforced timber beams. *Composites: Part B*, 113, 2017, 174-184.
- [25] E. P. Gomez, M. N. Gonzalez, K. Hosokawa, E. A. Cobo. Experimental study of the flexural behavior of timber beams reinforced with different kinds of FRP and metallic fibers. *Composite Structures*, 213, 2019, 308-316.
- [26] Z. W. Guan, P. D. Rodd, D. J. Pope. Study of glulam beams pre-stressed with pultruded GRP. *Computers and Structures*, 83, 2005, 2476-2487.
- [27] R. Kliger, R. Haghani, M Brunner, A. Harte, K. U. Schober. Wood-based beams strengthened with FRP laminates: improved performance with pre-stressed systems. *European Journal of Wood and Wood Products* 74, 2016, 319-330.
- [28] H. Yang, D. Ju, W. Liu, W. Lu. Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars. *Construction and Building Materials*, 109, 2016, 73-83.
- [29] S. Hay, S. Thiessen, D. Svecova, B. Bakht. Effectiveness of GFRP sheets for shear strengthening of timber. *Journal of Composites for Construction*, 10, 2006, 483-491.
- [30] R. Widmann, T. Tannert, R. Frei. Comparison of different techniques for the shear strengthening of glulam members. *Second Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures*, Istanbul, Turkey, 2013, 1-8.
- [31] M. Y. M. Al-Fasih, N. I. Mokhtar, Y. Ahmad, I. S. B. Ibrahim, S. A. Hassan. Shear performance of strengthened timber beam with intermittent GFRP strips. *Construction and Building Materials*, 312 2021, 125394.
- [32] D. Svecova, R. Eden. Flexural and shear strengthening of timber beams using GFRP bars – experimental investigation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31, 2004, 45-55.
- [33] T. R. Gentry. Performance of glued-laminated timbers with FRP shear and flexural reinforcement. *Journal of Composites for Construction*, 15, 2011, 861-870.
- [34] J. L. Coureau, E. Cuvillier, C. Lavergne. Strength of locally PGF reinforced end-notched beams. In: *Joints in Timber Structures*, S. Aicher, H. W. Reinhardt (eds) *International RILEM Symposium pro022*, 2001, 413-422.
- [35] R. Jockwer. Structural behaviour of glued laminated timber beams with unreinforced and reinforced notches, PhD Thesis, ETH Zurich, Switzerland, 2015.
- [36] S. Hallstrom. Glass fibre reinforced holes in laminated timber. *Wood Science and Technology*, 30, 1996, 323-337.
- [37] B. Enquist, P. J. Gustafsson, H. J. Larsen. Glass-fibre reinforcement perpendicular to the grain. *International Timber Engineering Conference*, London, UK, 1991, 3.242-3.250.
- [38] B Kasal, A. Heiduschke. Radial reinforcement of glue laminated wood beams with composite materials. *Forest Product Journal* 54, 2004,74-79.
- [39] B. Pizzo B, K. U Schober. On site interventions on decayed beam ends. In: *Core document of COST action E34 - Bonding of timber*, M. Dunky et al. (eds), *University of Natural Resources and Applied Life Sciences*, Vienna, 2008, 40-49.
- [40] B. Pizzo, M. Gavioli, M. Lauriola. Evaluation of a design approach to the on-site structural repair of decayed old timber end beams. *Engineering Structures*, 48, 2013, 611-622.
- [41] D. Smedley, P. Alam, M. P. Ansell. *George Street, St. Albans, UK - A case study in the repair of historic timber structures using bonded-in pultruded plates*. *World Conference on Timber Engineering*, Portland, USA, 2006.
- [42] M. Corradi, E. Speranzini, A. Borri, A. Vignoli. In-plane shear reinforcement of wood beam floors with FRP. *Composites: Part B*, 37, 2006, 310-319.
- [43] I. Glišović. *Teorijska i eksperimentalna analiza nosača od lepljenog lameliranog drveta ojačanih karbonskim trakama*. Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2013.
- [44] EN 338: *Structural timber - Strength classes*. CEN, Brussels, Belgium, 2010.
- [45] EN 408: *Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties*. CEN, Brussels, Belgium, 2010.
- [46] М. Тодоровић. Ојачање дрвених носача у зони редукације висине пресека. Докторска дисертација, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд, 2019.