

Primljen / Received: 5.9.2014.

Ispravljen / Corrected: 28.1.2015.

Prihvaćen / Accepted: 6.2.2015.

Dostupno online / Available online: 10.6.2015.

Utjecaji orijentacije slojeva CFRP traka na ojačanje šupljih čeličnih elemenata

Autori:



Mr.sc. **Md Humayun Kabir**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište Queensland, Australija
Građevinski fakultet
md.kabir@student.qut.edu.au



Dr.sc. **Sabrina Fawzia**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište Queensland, Australija
Građevinski fakultet
sabrina.fawzia@qut.edu.au



Prof.dr.sc. **Tommy H. T. Chan**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište Queensland, Australija
Građevinski fakultet
tommy.chan@qut.edu.au

Prethodno priopćenje

Md Humayun Kabir, Sabrina Fawzia, Tommy H. T. Chan

Utjecaji orijentacije slojeva CFRP traka na ojačanje šupljih čeličnih elemenata

U ovom se radu proučavaju utjecaji orijentacije slojeva CFRP traka (polimera ojačanih ugljičnim vlaknima) na poboljšanje nosivosti ojačanih čeličnih kružnih šupljih elemenata. Provedeno je ispitivanje savijanjem uz djelovanje sila u četiri točke, a elementi su opterećeni na savijanje do sloma. Poboljšanje nosivosti ojačanih cijevnih čeličnih elemenata analizirano je s obzirom na silu otkazivanja, krutost, kompozitno djelovanje i vrstu sloma. Nosači armirani CFRP trakama s dva uzdužna sloja i jednim po obodu pokazuju bolje ponašanje od nosača armiranih s jednim uzdužnim slojem i dva sloja po obodu.

Ključne riječi:

CFRP, orijentacija slojeva, nosivost, ojačanje, kružni šuplji profil, savijanje

Preliminary report

Md Humayun Kabir, Sabrina Fawzia, Tommy H. T. Chan

Effects of CFRP layer orientation on strengthening of hollow steel elements

This paper studies the effects of orientation of CFRP (carbon fibre reinforced polymer) strip layers on the improvement of bearing capacity of strengthened steel-made circular hollow elements. The four point bending test was conducted, and elements were subjected to bending until failure. The improvement of bearing capacity of strengthened tubular steel elements is presented in terms of failure load, stiffness, composite beam action, and modes of failure. Beams strengthened with CFRP strips with two longitudinal layers and one layer along the periphery performed better than the beams reinforced with one longitudinal layer and two layers along the periphery.

Key words:

CFRP, layer orientation, bearing capacity, strengthening, circular hollow section, bending

Vorherige Mitteilung

Md Humayun Kabir, Sabrina Fawzia, Tommy H. T. Chan

Einfluss der Ausrichtung von CFK Schichten auf die Verstärkung hohler Stahlelemente

In dieser Arbeit werden Einflüsse der Ausrichtung von CFK (carbonfaserverstärkter Kunststoff) Streifenschichten auf die Verbesserung der Tragfähigkeit verstärkter runder hohler Stahlelemente untersucht. Versuche wurden unter Biegebeanspruchung der Elemente mittels vier Punktlasten bis zum Versagen durchgeführt. Die Verbesserung der Tragfähigkeit verstärkter runder hohler Stahlträger ist bezüglich der Traglast, der Steifigkeit, der Verbundwirkung und des Versagensmechanismus analysiert. Durch zwei Schichten in Längs- und einer Schicht in Umfangsrichtung mit CFK Streifen verstärkte Träger zeigten ein besseres Verhalten als Träger mit einer Schicht in Längs- und zwei Schichten in Umfangsrichtung.

Schlüsselwörter:

CFK, Ausrichtung von Schichten, Tragfähigkeit, Verstärkung, runde Hohlprofile, Biegebeanspruchung

1. Uvod

Cijevni čelični profili široko su rasprostranjeni kao konstrukcijski i nekonstrukcijski elementi u prirodi, a nalazimo ih u mnogim inženjerskim građevinama, kao što je prikazano na slici 1. Općenito, takvi elementi imaju bolja svojstva uslijed djelovanja tlaka, torzije ili savijanja u svim smjerovima te su estetski privlačniji [1]. Stoga je upotreba takvih profila naglo porasla, prije svega za izvođenje obalnih i izvanobalnih konstrukcija. Kružni šuplji presjeci većinom se primjenjuju pri izgradnji morskih platformi gdje valovi mogu uzrokovati savijanje tih elemenata. Međutim, mnoge od tih građevina nisu trajne, a razlozi su pogreške u projektiranju, gubitak svojstava materijala, izloženost složenim vanjskim uvjetima ili povećanje uporabnog opterećenja. Ta pojava degradacije vrlo je značajna za inženjere koji se bave obnovom metalnih konstrukcija.

Glavni cilj obnove ili ojačanja konstrukcije jest povećanje nosivosti konstrukcije, a ne njezina zamjena, što je s obzirom na učinkovitiju gradnju, cijenu, vrijeme i estetski izgled mnogo bolji izbor. Konvencionalna tehnika zavarivanja dodatnih čeličnih ojačanja jedna je od mogućnosti, ali polimeri ojačani ugljičnim vlaknima su bolji izbor za slučajeve gdje su težina, trajnost i korozija od velike važnosti [2-4]. Štoviše, savijanje čeličnog lima u svrhu ojačavanja cijevnog profila predstavlja dodatni izazov. Ipak kompoziti s polimerima koji su ojačani ugljičnim vlaknima pokazali su se kao izvrsno rješenje i prikladna alternativa u takvim primjenama zbog svojih izvrsnih fizikalnih i mehaničkih svojstava, prije svega visoke otpornosti na koroziju i umanjene degradacije uslijed djelovanja atmosferilija, visoke vlačne čvrstoće, otpornosti na umor i smanjene težine. Štoviše, vrlo su fleksibilni pri oblikovanju, jednostavni su za rukovanje tijekom postavljanja, posebno u slučaju montaže na cijevne čelične profile [3, 5, 6]. Zbog tih prednosti, ugljičnim vlaknima ojačani polimeri (eng. *Carbon Fibre Reinforced Polymer* - CFRP) zajedno s adhezivima upotrebljavaju se za popravak i ojačanje metalnih konstrukcija, a ta se tehnologija često primjenjuje u zrakoplovnoj, nautičkoj, automobilskoj i prerađivačkoj industriji, ali i u građevinskoj industriji. Unatoč jedinstvenim prednostima, polimeri ojačani ugljičnim vlaknima vrlo su

osjetljivi na djelovanje požara. Prema zaključcima mnogih istraživanja, sustavi betonskih konstrukcija sa CFRP-om trebaju imati protupožarnu izolaciju, koja može poboljšati otpornost polimera na visoke temperature [7, 8]. Polimeri armirani karbonskim vlaknima uspješno se primjenjuju u popravcima i ojačanjima armiranobetonskih konstrukcija [3, 9, 10], što je u posljednje vrijeme popularna tema mnogih istraživanja [11-14]. Kombinacijom dvaju materijala, čelika i CFRP-a, povećava se čvrstoća, krutost, žilavost i nosivost ojačanog konstrukcijskog sustava. U većini provedenih istraživanja koja se bave tematikom povećavanja nosivosti ili obnove konstrukcija primjenom CFRP-a uglavnom su upotrijebljeni čelični profili otvorenog presjeka, primjerice profili I ili H koji su izloženi savijanju.

Jedan od najstarijih primjera jest ojačanje čeličnih I-profila u istraživanju koje su proveli Mertz i Gillespie Jr. [15] kako bi povećali otpornost na savijanje. Grede od dvostrukih simetričnih I-profila ojačane su različitim kombinacijama lijepljenog CFRP-a, a potom su izložene savijanju djelovanjem sile u četiri točke [16]. Colombi i Poggi [17] ispitivali su grede H-profila, a vanjski sloj ojačali su pomoću dva sloja i primijenili dvije različite vrste CFRP-a. Eksperimentalni rezultati ojačanih profila pokazali su povećanje graničnog opterećenja i krutosti, koji ovise o broju slojeva CFRP-a.

U zadnje vrijeme sve je više istraživanja kojima se ispituje ojačanje šupljih čeličnih elemenata izloženih tlačnom i vlačnom naprezanju. Utjecaj broja slojeva CFRP-a i orijentacija vlakana ispitivali su Shaat i Fam [18] za ojačane nosače (stupove) kvadratnog šupljeg profila (HSS) kraćeg i dužeg raspona izloženih centričnom tlaku. Slično ispitivanje proveo je Bambach sa svojim suradnicima [19], za spregnute šuplje čelične nosače izložene centričnom tlaku, na kojima su CFRP slojevi bili postavljeni u poprečnom (T smjer) i uzdužnom smjeru (L smjer), a primijenjene su dvije vrste ojačanja (1T1L - jedan sloj u poprečnom i jedan sloj u uzdužnom smjeru), 2T2L - dva sloja u poprečnom i dva sloja u uzdužnom smjeru). Na okruglim čeličnim cijevnim profilima postavljena su tri različita sloja polimera armiranih staklenim vlaknima (eng. *Glass Fiber Reinforced Polymer* - GFRP) u poprečnom smjeru, a potom su cijevi izložene centričnom tlaku [20].



Slika 1. Primjena čeličnih šupljih profila (CHS) [1]: a) bambus; b) estetska privlačnost; c) most s nosačem od cjevastih čeličnih profila

Značajan rast graničnog opterećenja ojačanih šupljih profila postignut je zahvaljujući CFRP trakama te njihovoj orijentaciji na elementu izloženom tlačnom opterećenju. Čelične cijevi vrlo visoke čvrstoće, različitih geometrija i sučelno zavarenih, ojačane su uzdužno pomoću pet slojeva CFRP traka te potom izložene vlačnom naprezanju [21]. U drugom ispitivanju [22], šuplje čelične cijevi su ojačane pomoću pet slojeva uzdužno položenih lamelate su ispitivane pod utjecajem centričnog vlaka. Rezultati su pokazali da se primjenom CFRP-a može povećati vlačna čvrstoća elemenata. Međutim, dosad je provedeno tek nekoliko ispitivanja u kojima se proučavao doprinos armiranog polimera na povećanje čvrstoće cijevnih šupljih čeličnih profila. U nedavnom istraživanju, Haedir i suradnici [23] ojačali su kompaktno, nekompaktno i vitke čelične cijevi CFRP-om, koje su opterećivale savijanjem uz primjenu sile u četiri točke. Različite kombinacije slojeva CFRP-a upotrijebljene su za ojačanje greda: HHL i HHLL varijante ojačanja za kompaktno i nekompaktno profile te L, LH, HHL, HHLL, HHHH i HLHL varijante ojačanja za vitke profile, pri čemu oznake L i H predstavljaju: L - CFRP trake položene u uzdužnom smjeru, H - CFRP trake položene po obodu. Eksperimentalni rezultati pokazali su da je granična nosivost ojačanih kompaktnih profila povećana za 3 % zahvaljujući HHL sloju, te 45 % za HHLL sloj. Međutim, u nekompaktnim profilima povećana je granična nosivost za 34 % (HHL) i 46 % (HHLL). Kod vitkih profila, granična nosivost povećana je za 60 % (HHL), 84 % (HHLL) i 92 % (HLHL).

Grede su omotane pomoću dva sloja tkanine koja sadrži vlakna postavljena u uzdužnom smjeru (LL), a treći je sloj (H) položen poprečno. Ojačanje kompaktnih profila povećalo je graničnu nosivost za 27 % u usporedbi s gredama bez ojačanja [24]. Iz dostupne literature očito je da

broj slojeva armiranog polimera, kao i orijentacija vlakana, utječu na čvrstoću profila, posebno kada su izloženi tlaku i savijanju. Također je uočeno da se kombinacijom triju slojeva CFRP-a, s HHL i LLH orijentacijom vlakana povećava granična čvrstoća za 3 do 27 % za kompaktno profile, a njihovo povećanje je najmanje od svih ostalih ispitivanih profila [23, 24]. Nekoliko istraživača predložilo je primjenu visokokvalitetnog elastičnog ljepila za bolje prijanjanje čelika i armiranog polimera. Uspješna primjena elastičnog ljepila prikazana je u [25], a zaključeno je da je postignuta veća trajnost veze. Također, i pjeskareni čelični profil može biti prethodno premazan ljepilom da bi se povećala veza između čelika i elastičnog ljepila. To bi moglo spriječiti prerano odljepljivanje, što se obično događa pri ojačanju čeličnih konstrukcija CFRP-om. Utjecaj orijentacije sloja kod CFRP s tri LHL sloja koji je izložen savijanju, nije još ispitan za kompaktno presjeka (pod kompaktnim presjekom smatra se presjek klase I). Kada je greda sa slojem LHL izložena savijanju, sloj H služi da ograniči prvi L sloj na zonu tlaka, a vanjski sloj L ograničava središnji H sloj na zonu vlaka. Općenito, polimeri

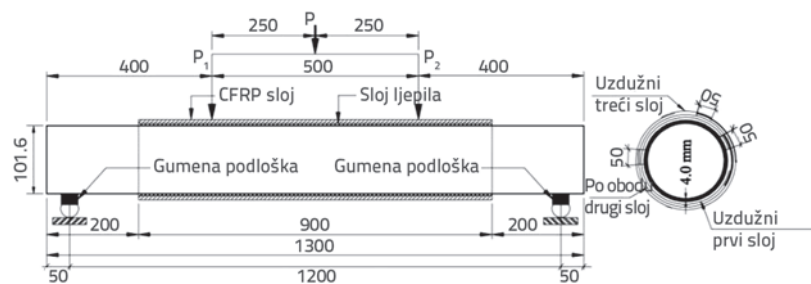
ojačani ugljičnim vlaknima i uzdužno položenim trakama (L varijanta) potpuno su učinkoviti u zoni vlaka, dok je učinkovitost traka po obodu (H varijanta) gotovo jednaka nuli.

Budući da je H sloj slab u vlačnoj zoni, ako se primjenjuje kao vanjski sloj, može povećati nosivost bolje nego L sloj. H sloj može omogućiti veću infiltraciju vlage, posebno u blizini morske površine.

Stoga se u ovom radu ispituju različiti LHL slojevi, zajedno s varijantama HHL i LLH različitih slojeva da bi se odredile najučinkovitije metode ojačanja uslijed savijanja. Za različite kombinacije slojeva proučavan je doprinos elastičnog ljepila.

2. Eksperimentalno ispitivanje

Eksperimentalno ispitivanje provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje materijala Banyo na Tehničkom sveučilištu u Queenslandu. Sva eksperimentalna ispitivanja provedena su na savijanje uz primjenu sile u četiri točke. Pripremljeno je dvanaest čeličnih cijevi kružnog presjeka, vanjskog promjera 101,6 mm, a debljine 4,0 mm. Duljina cijevi, određena prema obradljivosti i zahtjevima ispitivanja, bila je približno 1300 mm, a djelotvorni raspon iznosio je 1200 mm. Shema elementa izloženog savijanju prikazana je na slici 2.

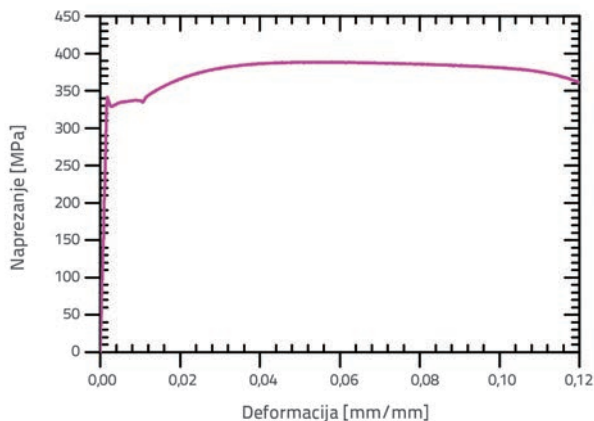


Slika 2. Shematski prikaz elementa (nosača) za ispitivanje

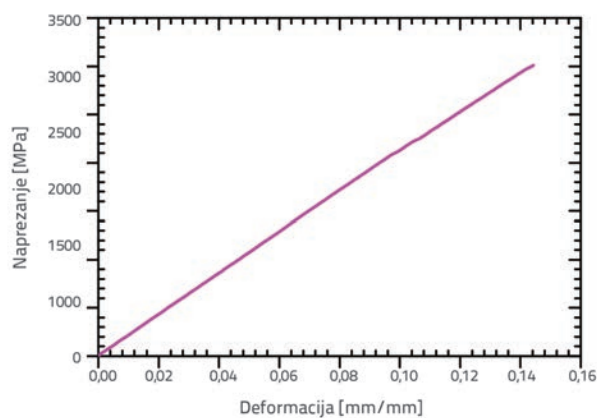
2.1. Svojstva materijala

Ispitivano CFRP ojačanje sastoji se od četiri materijala, uključujući: čeličnu cijev, polimer ojačan ugljičnim vlaknima *CFRP MBrace CF 130*, dva sloja epoksidne impregnacijske smole *MBrace saturant* i dva sloja prednamaza (*MBrace primer*). Prosječna vrijednost granice popuštanja, granična čvrstoća i modul elastičnosti čelične cijevi iznosili su 327 MPa, 383 MPa i 214 GPa, na temelju rezultata triju ispitanih elemenata. Primijenjeni polimer bila je jednosmjerna tkanina CF130, prema klasifikaciji *BASF construction chemicals Australia Pty Ltd.* Izmjereni modul elastičnosti iznosio je 205 GPa, a vlačna čvrstoća 2760 MPa. Dvokomponentna impregnacijska smola *MBrace saturant* ima vlačnu čvrstoću od 46 MPa i modul elastičnosti 2,86 GPa, a vrijednosti su dobivene nakon ispitivanja na vlak. Prema deklaraciji proizvođača, tlačna čvrstoća smole iznosi 80 MPa. Na slikama od 3. do 5. prikazana je karakteristična krivulja naprežanje-deformacija za čelik, polimer ojačan ugljičnim

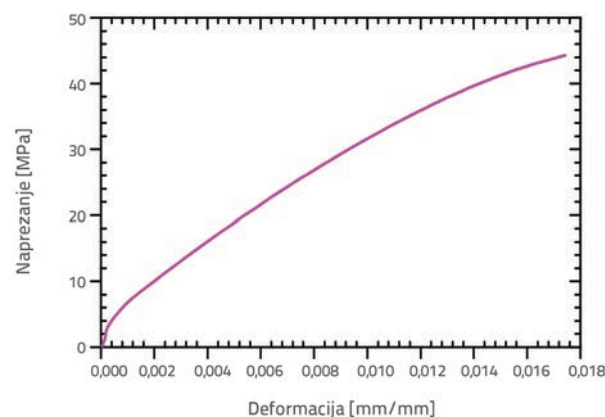
vlaknima i elastično ljepilo. Mehanička svojstva elastičnog ljepila *MBrace* nisu razmatrana u ovom istraživanju.



Slika 3. Dijagram naprezanje-deformacija za čelik



Slika 4. Dijagram naprezanje-deformacija za CFRP

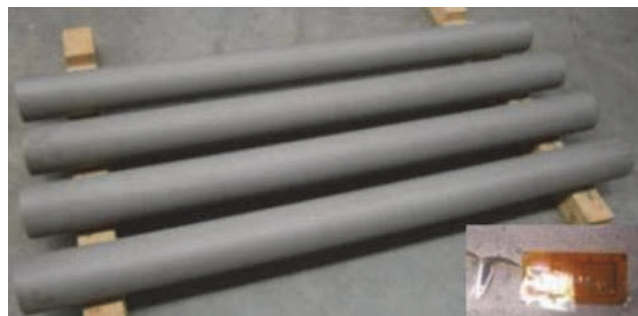


Slika 5. Dijagram naprezanje-deformacija za elastično ljepilo

2.2. Priprema uzoraka za ispitivanje

Kako bi se postigla hrapava i kemijski aktivna površina čelika za bolje prijanjanje, površina profila je pjeskarena (slika 6.), a nataložene čestice prašine i masnoće odstranjene su acetonom. Dva mjerna uređaja pričvršćena su na dobro očišćenu površinu

nosača, na sredini raspona gdje se pojavljuje maksimalni moment savijanja, kako bi se izmjerile vlačne deformacije. Površina triju uzoraka očišćena je acetonom, a potom je nanoseno elastično ljepilo te epoksidni premaz koji se sušio sat vremena. Preostala tri uzorka nisu površinski obrađena. Mješavina dvokomponentnog impregnacijskog ljepila pripremljena prema uputama proizvođača [26] nanosena je na površinu čelične cijevi. Obloga od vlaknima armiranog polimera izrezana je prema zadanim dimenzijama, a prvi sloj CFRP-a omotan je cijelom duljinom grede do krajeva koji nisu premazani ljepilom. Pomoću rebrastog valjka tkanina je prilijepljena u smjeru vlakana sve dok višak ljepila nije procijeđen kroz tkaninu. Potom je omotan drugi sloj tkanine, a vlakna su ovaj put postavljena u poprečnom smjeru u odnosu na os cijevi, da bi se ograničio uzdužni sloj, koji je izložen tlačnim naprezanjima uslijed savijanja. Treći sloj CFRP-a postavljen je na drugi sloj u uzdužnom smjeru na isti način kao i prvi sloj. Cijeli postupak proveden je na vlažnoj površini, koja upućuje na to da je donji sloj ostao ljepljiv. Da bi se postigla kvalitetna i ujednačena veza između CFRP-a i čelika, tkanina je omotana samoljepivom vrpcom tijekom 24 sata, kao što je prikazano na slici 7.a. Nakon toga vrpca je skinuta, a pripremljeni uzorci njegovani su još dva tjedna na sobnoj temperaturi (slika 7.b).



Slika 6. Pjeskarene čelične grede i uređaji za mjerenje

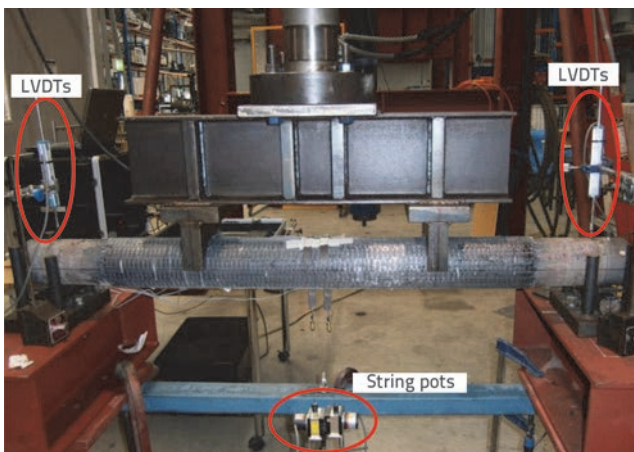


Slika 7. Njegovanje uzoraka na sobnoj temperaturi: a) uzorak sa samoljepivom vrpcom; b) uzorak nakon skidanja samoljepive vrpce

2.3. Ispitivanje uzoraka i mjerni uređaji

Ispitivanja su provedena na hidrauličnoj preši *MTS* nosivosti 230 kN, naprezanjem greda savijanjem uz primjenu sile u četiri

točke, a ležajevi su postavljeni na dvije pravokutne gumene podloge. Shema ispitivanja prikazana je na slici 8. Opterećenje se primjenjuje uz kontrolu pomaka, a iznos se povećava do sloma grede. Dva dodatna mjerna uređaja pričvršćena su na vanjski sloj CFRP-a. Dva uređaja na sredini raspona mjere prosječan progib. LVDT senzori (pretvarač pomaka - linearni varijabilni diferencijalni- LVDT) na osloncima su mjerili progibe na kraju grede. Nakon toga je određen stvarni progib tako što se ne ubroji pomak na osloncima i progib na sredini raspona. Podaci iz mjernih uređaja i LVDT senzora pohranjeni su u računalnom programu LABVIEW. Na isti način zabilježena su sva opterećenja i stvarni pomaci.



Slika 8. Shema ispitivanja

3. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja

3.1. Opterećenje do sloma

Tablica 1. prikazuje opterećenja ili otpornost uslijed progiba $L_e / 250$, nakon kojih se događaju pukotine ili se prekoračuje granično stanje ili pak dolazi do sloma nosača. Prikazani su i odgovarajući koeficijenti prosječnih i graničnih opterećenja ojačanih uzoraka $P_{savg}^{(cs)}$ i $P_{uavg}^{(cs)}$, s obzirom na obične čelične nosače $P_{savg}^{(s)}$ i $P_{uavg}^{(s)}$ izložene savijanju. Također se može vidjeti da nosači ojačani polimerima od ugljičnih vlakana imaju veću nosivost za granično stanje i granično stanje uporabljivosti za različitu orijentaciju slojeva, u usporedbi s običnim nosačima. Također je prikazano da je nosivost nosača s obrađenom površinom i različitom orijentacijom slojeva slična.

3.1.1. Doprinos CFRP-a, elastičnog ljepila i samoljepive vrpce na nosivost i graničnu čvrstoću ojačanih greda

Tri sloja CFRP-a s različitom orijentacijom vlakana doprinose povećanju granične čvrstoće učinkovitom aktivacijom čvrstoće uzdužnih vlakana i ograničenim djelovanjem vlakana u srednjem sloju (tablica 1.). Metode ojačavanja (LHL, HHL i LLH, gdje je L uzdužni sloj, a H je omotani sloj), koje se primjenjuju u ovom istraživanju za obrađivanje uzoraka, mogu povećati prosječno graničnu nosivost do maksimalnih vrijednosti za 31,0 %, 29,0 % i 33,0 % za grede sa slojevima LHL, HHL i LLH, za razliku od običnih

Tablica 1. Detalji ispitivanja, otpornost nosača na opterećenje, vrsta sloma greda

Oznaka uzorka	Broj uzoraka	Stanje površinskog sloja uzorka	Vrsta ojačanja uzorka	P_g pri $L_e/250$ [kN]	$P_{savg}^{(cs)}/P_{savg}^{(s)}$	P_u [kN]	$P_{uavg}^{(cs)}/P_{uavg}^{(s)}$	Vrsta sloma
B2_US	2	Bez obrade	Bez ojačanja	44,10 50,30	-	76,75 78,40	-	Žilavi lom
S4B-1	2	Nije obrađen	LHL	60,00 69,00	1,37	94,40 99,75	1,25	Lokalno izvijanje stijenke, slom CFRP-a, odvajanje lamele na krajevima
S5B-1	2	Obrađen	LHL	64,00 66,00	1,38	101,70 102,00	1,31	Lokalno izvijanje stijenke, slom CFRP-a, odvajanje lamele na krajevima
S6A-1	1	Nije obrađen	HHL	62,00	1,31	98,20	1,27	Pucanje CFRP-a i razvlačenje čelika, nema odvajanja lamele na krajevima
S6B-1	2	Obrađen	HHL	62,50 62,80	1,33	100,32 99,65	1,29	Pucanje CFRP-a i razvlačenje čelika, nema odvajanja lamele na krajevima
S6A-2	1	Nije obrađen	LLH	62,00	1,31	101,00	1,30	Lokalno izvijanje stijenke, slom CFRP-a, odvajanje lamele na krajevima
S6B-2	2	Obrađen	LLH	66,00 69,00	1,43	102,00 104,00	1,33	Lokalno izvijanje stijenke, slom CFRP-a, odvajanje lamele na krajevima

nosača. Slično, nosivost za granično stanje uporabljivosti povećana je za 38,0 %, 33,0 % i 43,0 %.

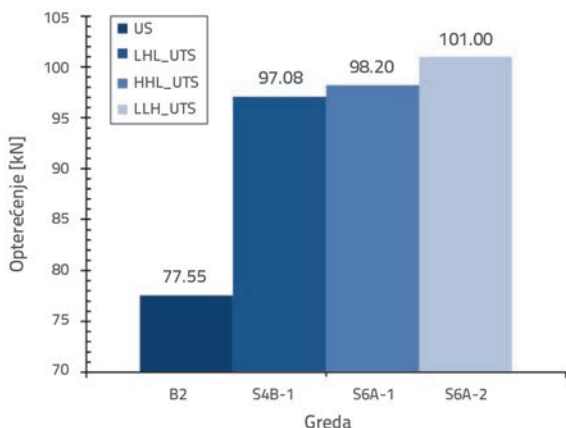
Prethodna su ispitivanja [23] pokazala da je maksimalna granična nosivost kompaktnih nosača kružnog profila (debljine 2,70 mm, a vanjskog promjera 33,81 mm) s HHL slojem povećana 3 %.

Slično tomu, maksimalno povećanje graničnog opterećenja bilo je 27 % za ojačane kompaktne kružne šuplje profile (debljine 4,9 mm, vanjskog promjera 168,5 mm) i pomoću *Tyfo* polimera koji sadrže ugljična vlakna s prosječnom vlačnom čvrstoćom 500 MPa i modulom elastičnosti 62.500 MPa, ispitivanih u prethodnim istraživanjima koja su proveli Seica i Packer [24], gdje je LLH primijenjen u kombinaciji s CFRP kompozitima i ispitan na savijanje primjenom sile u četiri točke. Može se zaključiti da je čvrstoća ojačanih nosača s tri sloja CFRP-a šest posto veća nego ona dobivena u prethodnim ispitivanjima.

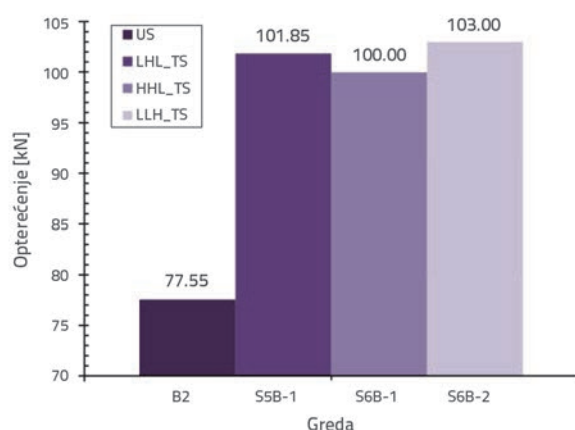
Razlog veće nosivosti nosača može biti u tome što je povećanje veza zbog jednoličnog tlaka koji nastaje pri omatanju grede samoljepivom vrpcom, te zbog premaza *MBrace*. Štoviše, razlika u povećanju čvrstoće između tri (HHL) i četiri (HHLL) sloja iznosila je 42 % u [23], dok je razlika bila 12 % za grede s tri LHL sloja u usporedbi s nosačima ovijenima s četiri HHLL sloja ispitivanim u prethodnim istraživanjima, iako je primjena s četiri sloja vremenski i troškovno neisplativa.

3.1.2. Utjecaj orijentacije vlakana na graničnu čvrstoću neobrađenih ojačanih nosača

Utjecaj orijentacije vlakana na prosječnu graničnu čvrstoću neobrađenih ojačanih nosača prikazan je na slici 9. Neobrađeni nosač S6A-2 pokazuje veću nosivost u usporedbi s preostala dva nosača S4B-1 i S6A-1, koji su orijentacijom slojeva LHL i HHL ojačani polimerima od ugljičnih vlakana. Može se vidjeti da nosač S6A-1 pokazuje malo veću graničnu nosivost nego nosač S4B-1, iako sadrži veći broj uzdužno postavljenih slojeva vlakana. To može biti zbog slabije veze, koja može uzrokovati rano pucanje veze kada je nosač izložen postupnom povećavanju opterećenja. S druge strane, nosivost nosača S6A-1 bila je 2,85 % manja nego nosivost nosača S6A-2 koji ima veći broj uzdužnih slojeva s različitim orijentacijama tih slojeva (LLH).



Slika 9. Granična nosivost običnih i ojačanih nosača bez obrađivanja površine



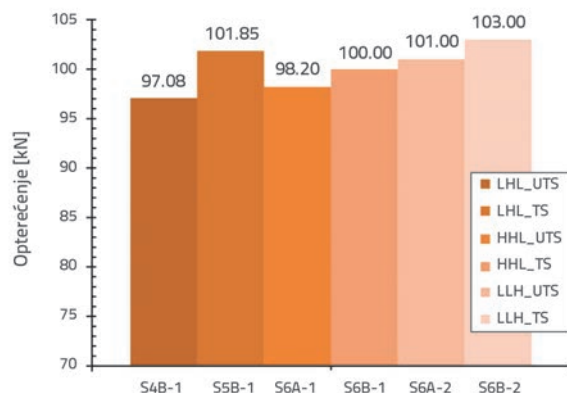
Slika 10. Granična nosivost običnih i ojačanih nosača s obrađenom površinom

3.1.3. Utjecaj orijentacije vlakana na graničnu čvrstoću ojačanih nosača s obrađenom površinom

Za ojačane nosače s obrađenom površinom koja se može vidjeti na slici 10, poboljšanje granične nosivosti je minimalno. Međutim, može se vidjeti da su prilikom sloma nosači S5B-1 i S6B-2 s orijentacijom vlakana LHL i LLH, s istim brojem uzdužnih vlakana bili nešto čvršći nego nosač S6B-1 s manjom količinom uzdužnih vlakana. Zanimljivo je kako obrađeni nosači S5B-1 i S6B-2, koji imaju dva sloja uzdužnih vlakana, postižu gotovo isto poboljšanje nosivosti, iako su orijentacija i položaj slojeva različiti. Eksperimentalni rezultati pokazuju da povećanje nosivosti nosača s obrađenom i neobrađenom površinom nije konzistentno. To može biti zbog različite učinkovitosti ostvarene veze između čelika i elastičnog ljepila ili CFRP slojeva.

3.1.4. Utjecaj obrađivanja površine na graničnu čvrstoću ojačanog nosača

Površine šest nosača, uključujući i nosače s istim svojstvima i različitim orijentacijama vlakana, premazane su *MBrace* elastičnim ljepilom kako bi se postiglo bolje prijanjanje, dok ostala četiri nosača nisu obrađena.



Slika 11. Granična nosivost za ojačane neobrađene i obrađene nosače

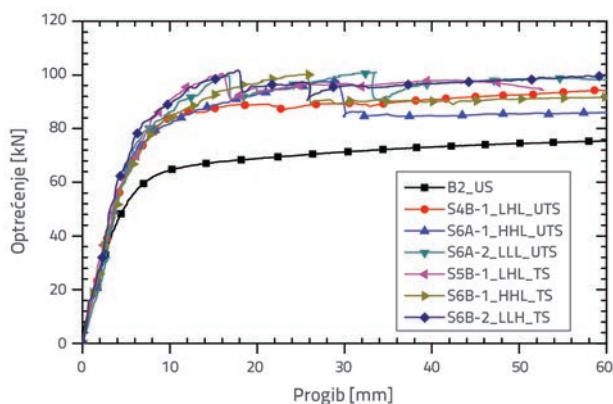
Prosječna granična nosivost ojačanih nosača s različitim orijentacijom slojeva (slika 11.) pokazuje da obrađeni nosači S5B-1, S6B-1 i S6B-2 imaju bolja svojstva od neobrađenih nosača S4B-1, S6A-1 i S6A-2. Stoga se može zaključiti da impregnacija poput epoksidne smole *Mbrace premaz* može poboljšati prionjivost čelika i CFRP-a za različite kombinacije longitudinalnih i srednjih slojeva, iako to poboljšanje nije značajno. Međutim, kada se razmatra trajnost elementa u vlažnim okolišnim uvjetima, taj tanki adhezivni sloj može biti koristan jer se stvara pasivni sloj koji služi kao zaštita protiv galvanске korozije smanjujući infiltraciju vlage koja obično pogoršava prionjivost čelika i ljepila [25].

3.2. Progib na sredini raspona

Progib nastaje kao odgovor na opterećenje na običnim i ojačanim nosačima s različitim orijentacijom vlakana, a prikazan je na slikama od 12. do 15., gdje se vidi utjecaj slojeva od polimera armiranih karbonskim vlaknima, orijentacije vlakana i obrađivanje površine čelika na krutost ojačanog nosača.

3.2.1. Doprinos armiranog polimera na krutost ojačanog nosača

Slika 12. prikazuje da nosači ojačani polimerima od karbonskih vlakana s LHL, HHL i LLH slojevima imaju veću krutost nego obični nosači B2 pri porastu opterećenja od 40 kN pa do sloma. Stoga se može zaključiti da je ostvarena veća krutost na nosačima ojačanim CFRP-om. Povećanje krutosti je u skladu s rezultatima koje su dobili Seica i Packer [24] u svom ispitivanju kružnih šupljih profila s CFRP-om u HHL smjeru, napreznih na savijanje.



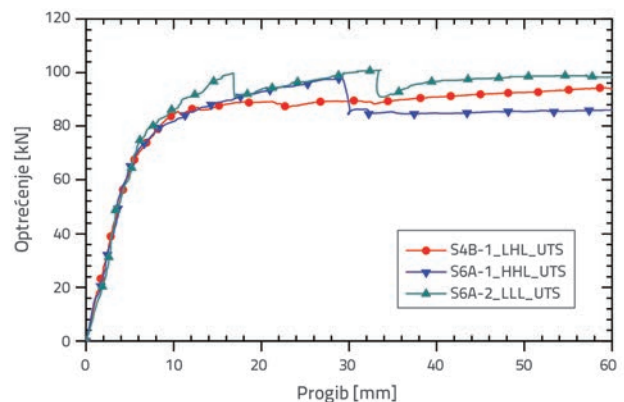
Slika 12. Krivulja opterećenje- progib za obične i ojačane nosače

3.2.2. Utjecaj CFRP-a na krutost ojačanog nosača neobrađene površine

Utjecaj orijentacije slojeva na krutost neobrađenih ojačanih nosača S4B-1, S6A-1 i S6A-2 prikazan je na slici 13. Može se vidjeti da su svi uzorci imali vrlo sličan progib i linearno elastično

ponašanje do opterećenja od 72 kN, nakon čega se mijenja u neelastično i prelazi u plastičnu fazu.

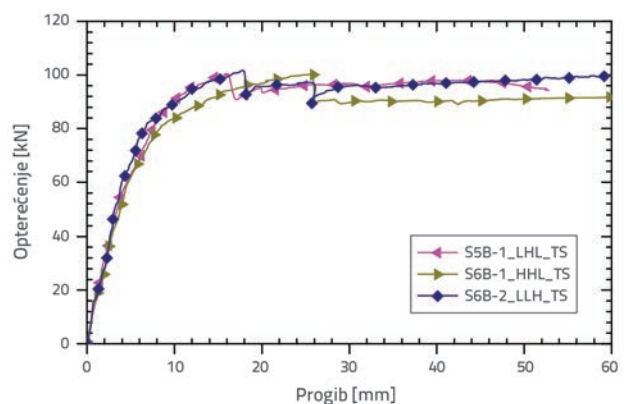
Uočeno je da u plastičnoj zoni površinski neobrađena greda s vlaknima orijentiranim u LLH smjeru pokazuje srednju razinu krutosti bez popuštanja nosivosti. Odvajanje počinje u ranoj fazi opterećenja kada progib iznosi 10 mm, a potom se povećava s povećanjem opterećenja. Slabija svojstva nosača S4B-1 vjerojatno su razlog slabe prionjivosti čelika.



Slika 13. Krivulja opterećenje-progib za ojačane neobrađene nosače

3.2.3. Utjecaj orijentacije vlakana na krutost obrađenih ojačanih nosača

Na slici 14. prikazani su utjecaji orijentacije vlakana na krutost obrađenih ojačanih nosača S5B-1, S6B-1, S6B-2 sa slojevima LHL, HHL, i LLH. Može se vidjeti da nosači sa slojevima LHL, HHL i LLH imaju slične vrijednosti progiba i pokazuju linearno elastično ponašanje pri opterećenju do 78 kN, a nakon toga prelazi u neelastično.



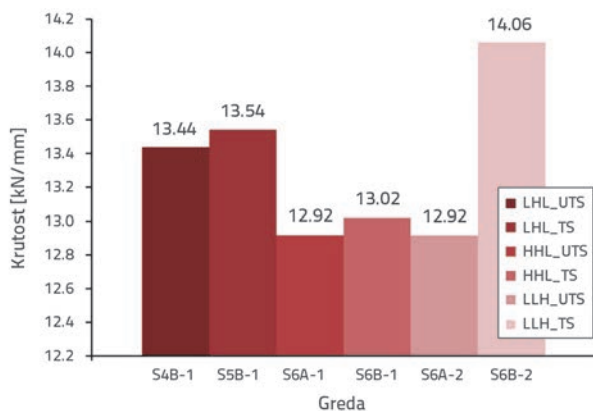
Slika 14. Krivulja opterećenje-progib za ojačane obrađene nosače

U plastičnoj zoni progib se povećava do opterećenja od 100 kN postavljenog na nosače S5B-1 i S6B-2 sa slojevima LHL i LLH. Nosači S5B-1 i S6B-2 sa slojevima LHL i LLH pokazuju kruće ponašanje nego nosač S6B-1 s HHL slojem u plastičnoj zoni do pojave pukotina, gdje se pretpostavlja iznenadno

odvajanje ili drobljenje CFRP-a. Međutim, u slučaju nosača S6B-1, prva pojava pukotina je odgođena, a potom se pojavljuje veći progib nego kod nosača sa slojevima LHL i LLH. Štoviše, krutosti nosača sa slojevima LHL i LLH i sličnim brojem uzdužnih slojeva od vlakana zanemarivo se razlikuju nakon popuštanja krutosti uslijed izmjerenih vrijednosti progiba.

3.2.4. Utjecaj obrađivanja površine čelika na krutost ojačanih nosača

Na slici 15. prikazana je krutost ojačanih nosača s obrađenom i neobrađenom površinom s LHL, HHL i LLH slojevima za granično stanje uporabljivosti ($L_e/250$) za profile koji su osjetljivi na krsti lom. Možemo vidjeti da nosači S5B-1 i S6B-1 s LHL i HHL slojevima s obrađenom površinom imaju malo veću krutost nego nosači S4B-1 i S6A-1 bez obrađene površine. Međutim kod LLH slojeva, povećanje krutosti je značajnije kod nosača s obrađenim površinama. Stoga se može reći da je primjena elastičnog ljepila poboljšala vezu između čelika i ljepila povećanjem krutosti površine obrađenih nosača izloženih maksimalnom dopuštenom opterećenju.

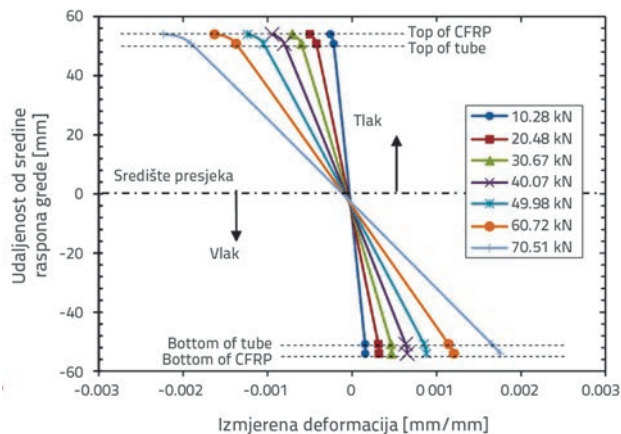


Slika 15. Krutost ojačanih nosača pri graničnom stanju uporabljivosti ($L_e/250$)

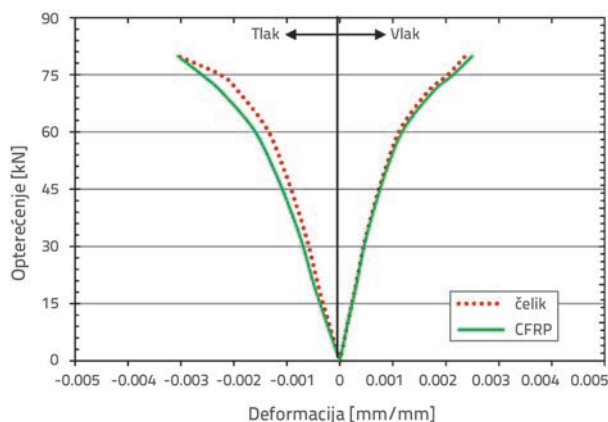
3.3. Kompozitno djelovanje nosača

Četiri električna uređaja za mjerenje deformacija pričvršćena su na nosače kako bi se bilježilo kompozitno djelovanje tlačne i vlačne zone nosača. Slika 16. prikazuje povećanje jednolikog vlačnog naprezanja za čelik i CFRP na nosaču izloženom opterećenju do 75 kN. To pokazuje da se kompozitno djelovanje nastavlja do ove razine, što je daleko veće od granice popuštanja. Deformacije na vrhu i dnu ojačanog nosača prikazane su na slici 17. Deformacije CFRP-a i čelika u vlačnoj zoni nosača ostaju linearne uslijed porasta opterećenja do 70,52 kN. Stoga možemo zaključiti da su nosači ostali ravni i da je postignuto kompozitno djelovanje. Međutim, krivulje u tlačnoj zoni pokazuju da profil ima nelinearno ponašanje, počevši od manjih deformacija, koje su se povećavale s većim iznosom opterećenja. Taj fenomen

moguć je uslijed postupnog odvajanja i mikropukotina CFRP-a u tlačnom pojasu nosača. S obzirom na to, možemo zaključiti da je kompozitno djelovanje u tlačnoj zoni bilo djelomično, a neutralni pojas nosača se postupno pretvarao u vlačni. To zapažanje je u skladu sa zaključcima koje su donijeli Seica i Packer u svom istraživanju [24].



Slika 16. Krivulja opterećenje-deformacija za čelik i nosač ojačan CFRP-om



Slika 17. Deformacije na različitim debljinama ojačanog nosača pri različitim opterećenjima

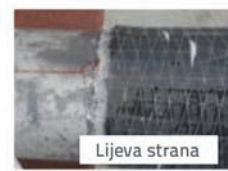
3.4. Vrste sloma ispitivanih nosača

Vrste sloma ispitivanih običnih i ojačanih nosača s različitom orijentacijom zaštitnih slojeva prikazane su na slici 18. Duktilni lom pojavio se na svim uzorcima, odnosno na nosačima sa zaštitnim slojevima u LHL i LLH smjeru zbog izvijanja kružnog profila u tlačnoj zoni u blizini mjesta opterećenja na kojima je također zabilježeno i drobljenje slojeva od ojačanog polimera. Takva vrsta loma pokazuje da se ojačani nosač slomio prije postizanja savojne čvrstoće, zbog izvijanja nosača u tlačnoj zoni, nakon čega je nastalo drobljenje CFRP sloja u vlačnoj zoni nosača. Također može se zaključiti da se manje odvajanje dogodilo u vlačnoj zoni na oba kraja nosača, a povećavalo se s povećanjem opterećenja, uslijed velikog naprezanja na krajevima nosača. CFRP je na vlačnom dijelu nosača ostao nepromijenjen.

a) B-2_US



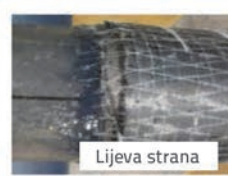
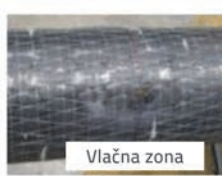
b) LHL orijentacija CFRP traka za ojačanje grede



c) HHL orijentacija CFRP traka za ojačanje grede



d) LLH orijentacija CFRP traka za ojačanje grede



Slika 18. Vrste sloma na ispitivanim nosačima: a) B-2_US; b) LHL; c) HHL; d) LLH

S druge strane, na nosačima S6A-1 i S6B-1 s HHL slojem pojavile su se drugačije vrste slomova. Slom se dogodio zbog drobljenja CFRP sloja i popuštanja čelika u vlačnoj i tlačnoj zoni. Takva vrsta sloma obično se događa na ojačanim nosačima izloženim savijanju. Nije bilo odvajanja na krajevima nosača s HHL slojevima sve do sloma, što je vrlo zanimljivo. Međutim, možemo zaključiti da je dosegnuta puna nosivost nosača u tom slučaju jer je jedan uzdužni sloj zamijenjen ovojem od CFRP-a.

4. Zaključak

U ovom istraživanju ispitivan je utjecaj orijentacije zaštitnih slojeva na ponašanje kružnog čeličnog profila ojačanog polimerima s ugljičnim vlaknima. Nosači s LHL i LLH orijentacijom CFRP traka za ojačanje, premazani epoksidnom smolom pokazali su vrlo sličnu nosivost. Elastično ljepilo *MBrace premaz* povećalo je čvrstoću i krutost nosača s različitom orijentacijom vlakana. Na temelju istraživanja, doneseni su sljedeći zaključci:

1. Ojačani čelični kružni nosači s tri sloja CFRP-a i različitom orijentacijom slojeva pokazali su maksimalnu nosivost koja je 43, odnosno 33 % veća nego kod običnih neojačanih nosača. Razlike između nosača s obrađenom i neobrađenom ovojom

površinom bile su minimalne, a nosači s LHL i LLH slojevima imali su bolja svojstva nego nosači s HHL slojevima. Štoviše, neobrađeni nosači s LHL, HHL i LLH slojevima imali su veću nosivost nego neobrađeni nosači s istom orijentacijom slojeva.

2. Obični i ojačani nosači s različitom orijentacijom vlakana imaju sličnu krutost pri nižim vrijednostima opterećenja. Pri većem iznosu opterećenja ojačani nosači pokazali su veću krutost. U elastičnoj zoni krutost je tih nosača bila jednaka. Uslijed djelovanja maksimalnog uporabnog opterećenja obrađeni nosači pokazali su nešto veću krutost nego neobrađeni. Najznačajnije razlike uočene su u plastičnoj zoni. Međutim, te razlike bile su slične kod obrađenih nosača, osim nosača s HHL slojem.
3. Kompozitno djelovanje nosača s CFRP-om ostvareno je do određenog opterećenja. Zabilježene su dvije različite vrste sloma ojačanih nosača s različito orijentiranim slojevima. Do otkazivanja obrađenog i neobrađenog nosača s LHL i LLH slojevima došlo je zbog izvijanja kružnog profila i drobljenja vlakana u tlačnoj zoni u blizini točke opterećenja. Međutim, obrađeni i neobrađeni nosači s HHL slojem otkazali su zbog pucanja CFRP-a i popuštanja čelika u vlačnoj zoni. U tlačnoj zoni također je došlo do sloma i popuštanja čelika.

4. Bez obzira na to što su razlike u svojstvima obrađenih nosača s LHL i LLH slojevima male, obje orijentacije slojeva mogu se primijeniti za ojačavanje kružnih šupljih čeličnih nosača izloženih savijanju. Međutim, promatrajući s teorijskog stajališta, preporučljivo je primjenjivati LHL orijentaciju kako bi se smanjilo upijanje vlage u vlažnim okolišnim uvjetima.

Zahvala

Autori zahvaljuju Tehničkom sveučilištu u Queenslandu (QUT) za pruženu podršku i realizaciju ovog ispitivanja. Također zahvaljuju svim sudionicima koji su svojim doprinosom direktno ili indirektno pomogli u istraživanju.

LITERATURA

- [1] Wardenier, J.: *Hollow Sections in Structural Applications*, Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire, The Netherlands, 2001.
- [2] Tavakkolizadeh, M., Saadatmanesh, H.: *Strengthening of Steel-Concrete Composite Girders using Carbon Fiber Reinforced Polymers Sheets*, Journal Of Structural Engineering-ASCE, 129, pp. 30-40, 2003., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:1\(30\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:1(30))
- [3] Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T., Lam, L.: *FRP-Strengthened RC Structures*, West Sussex, United Kingdom, John Wiley and Sons Ltd, 2002.
- [4] Zhao, X.-L.: *FRP-strengthened metallic structures*, CRC Press, 2014.
- [5] Alsayed, S., Al-Salloum, Y., Almusallam, T.: *Fibre-Reinforced Polymer Repair Materials - Some Facts*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering, London, Thomas Telford Services Ltd, pp. 131-134, 2000., <http://dx.doi.org/10.1680/cien.2000.138.3.131>
- [6] Cromwell, J., Harries, K., Shahrooz, B.: *Environmental Durability of Externally Bonded FRP Materials Intended for Repair of Concrete Structures*, Construction and Building Materials, 25, pp. 2528-2539, 2011., <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.096>
- [7] López, C., Firmo, J., Correia, J., Tiago, C.: *Fire Protection Systems for Reinforced Concrete Slabs Strengthened with CFRP Laminates*, Construction and Building Materials, 47, pp. 324-333, 2013., <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.019>
- [8] Firmo, J., Arruda, M., Correia, J.: *Contribution to the Understanding of the Mechanical Behaviour of CFRP-Strengthened RC Beams Subjected to Fire: Experimental and Numerical Assessment*, Composites Part B: Engineering, 66, pp. 15-24, 2014., <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.04.007>
- [9] Haritos, N., Hira, A.: *Repair and Strengthening of RC Flat Slab Bridges using CFRPs*, Composite Structures, 66, pp.555-562, 2004., <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.05.003>
- [10] Haritos, N., Hira, A., Mendis, P., Perera, U.: *Repair and Strengthening of Reinforced Concrete Structures Using CFRPs*, Advances in Structural Engineering, 9, pp.1-9, 2006. <http://dx.doi.org/10.1260/136943306776232882>
- [11] Fawzia, S., Al-Mahaidi, R., Zhao, X.: *Experimental and Finite Element Analysis of a Double Strap Joint between Steel Plates and Normal Modulus CFRP*, Composite Structures, 75, pp.156-162, 2006., <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.04.038>
- [12] Fawzia, S., Zhao, X., Al-Mahaidi, R.: *Bond-Slip Models for Double Strap Joints Strengthened by CFRP*, Composite Structures, 92, pp. 2137-2145, 2010., <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.09.042>
- [13] Narmashiri, K., Jumaat, M., Sulong, N.H.R.: *Strengthening of Steel I-Beams Using CFRP Strips: An Investigation on CFRP Bond Length*, Advances in Structural Engineering, 15, pp. 2191-2204, 2012., <http://dx.doi.org/10.1260/1369-4332.15.12.2191>
- [14] Fawzia, S.: *Evaluation of Shear Stress and Slip Relationship of Composite Lap Joints*, Composite Structures, 100, pp. 548-553, 2013., <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.12.027>
- [15] Mertz, D.R., Gillespie, Jr. J.W.: *Rehabilitation of Steel Bridge Girders through the Application of Advanced Composite Materials*, 1996.
- [16] Linghoff, D., Haghani, R., Al-Emrani, M.: *Carbon-Fibre Composites for Strengthening Steel Structures, Thin-Walled Structures*, 47, pp. 1048-1058, 2009., <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2008.10.019>
- [17] Colombi, P., Poggi, C.: *An Experimental, Analytical and Numerical Study of the Static Behavior of Steel Beams Reinforced by Pultruded CFRP Strips*, Composites Part B, 37, pp. 64-73, 2006., <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.03.002>
- [18] Shaat, A., Fam, A.: *Axial Loading Tests on Short and Long Hollow Structural Steel Columns Retrofitted using Carbon Fibre Reinforced Polymers*, Canadian Journal of Civil Engineering, 33, pp. 458-470, 2006., <http://dx.doi.org/10.1139/105-042>
- [19] Bambach, M.R., Jama, H.H., Elchalakani, M.: *Axial Capacity and Design of Thin-Walled Steel SHS Strengthened with CFRP, Thin-Walled Structures*, 47, pp. 1112-21, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2008.10.006>
- [20] Teng, J.G., Hu, Y.M.: *Behaviour of FRP-Jacketed Circular Steel Tubes and Cylindrical Shells under Axial Compression*, Construction and Building Materials, 21, pp. 827-838, 2007., <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.016>
- [21] Jiao, H., Zhao, X.L.: *CFRP Strengthened Butt-Welded Very High Strength (VHS) Circular Steel Tubes, Thin-Walled Structures*, 42, pp. 963-978, 2004., <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2004.03.003>
- [22] Fawzia, S., Al-Mahaidi, R., Zhao, X.L., Rizkalla, S.: *Strengthening of Circular Hollow Steel Tubular Sections using High Modulus CFRP Sheets*. Construction and Building Materials, 21, pp. 839-845, 2007., <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.014>
- [23] Haedir, J., Bambach, M.R., Zhao, X.L., Grzebieta, R.H.: *Strength of Circular Hollow Sections (CHS) Tubular Beams Externally Reinforced by Carbon FRP Sheets in Pure Bending*, Thin-Walled Structures, 47, pp. 1136-1147, 2009., <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2008.10.017>
- [24] Seica, M.V., Packer, J.A.: *FRP Materials for the Rehabilitation of Tubular Steel Structures, for Underwater Applications*, Composite Structures, 80, pp. 440-450, 2007., <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.05.029>
- [25] Dawood, M., Rizkalla, S.: *Environmental Durability of A CFRP System for Strengthening Steel Structures*, Construction and Building Materials, 24, pp. 1682-1689, 2010., <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.023>
- [26] BASF Construction Chemicals Australia Pty Ltd.: *MBrace Application Guidelines (MBrace Fabric)*, 11 Stanton road seven hills, NSW 2147, Australia, 2009.