

Kabeli i trake od složenih materijala za prednapinjanje

Kindij, Alex; Sorić, Zorislav

Source / Izvornik: **Građevinar, 2005, 57, 319 - 326**

Journal article, Published version

Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:354736>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-17**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



Kabeli i trake od složenih materijala za prednapinjanje

Alex Kindij, Zorislav Sorić

Ključne riječi

kabeli,
prednapinjanje,
trake za prednapinjanje,
složeni materijali,
proizvodi od ugljičnih
vlakana

Key words

cables,
prestressing,
prestressing strips,
composite materials
carbon fibre products

Mots clés

câbles,
précontrainte,
bandes pour la
précontrainte,
matériaux composites
produits à fibres de
carbone

Ключевые слова

кабеля, предварительное
напряжение,
ленты для
предварительного
напряжения,
сопряжённые материалы,
продукты из
углеродистых волокон

Schlüsselworte

Kabel,
Vorspannung,
Vorspannungsbänder,
Verbundbaustoffe,
Kompositbaustoffe,
Erzeugnisse aus
Kohlenstoffasern

A. Kindij, Z. Sorić

Pregledni rad

Kabeli i trake od složenih materijala za prednapinjanje

U radu su dani osnovni podaci o kabelima i trakama za prednapinjanje od složenih materijala. Navedena su svojstva takvih kabela i njihove prednosti i nedostaci u odnosu na čelične kabele za prednapinjanje. Za tri tipa kabela, od staklenih vlakana (GFRP), aramidnih vlakana (AFRP) i ugljičnih vlakana (CFRP), navedeni su primjeri izvedenih građevina sa posebnim osvrtom na tehnologije i vrste proizvoda od ugljičnih vlakana. Ukazano je na problem sidrenja i unos sile prednapinjanja.

A. Kindij, Z. Sorić

Subject review

Prestressing cables and strips made of composite materials

Basic data about prestressing cables and strips made of composite materials are presented in the paper. Properties of such cables and their advantages and disadvantages when compared to steel prestressing cables are presented. Examples of realized structures are given for three types of cables, i.e. glass fibre cables (GFRP), aramide fibre cables (AFRP) and carbon fibre cables (CRRP), and a special emphasis is placed on the technologies and types of products made of carbon fibres. The problems with anchoring and with the application of prestressing force are presented.

A. Kindij, Z. Sorić

Ouvrage de synthèse

Câbles et bandes précontraintes fabriquées en matériaux composites

Les données essentielles sur câbles et bandes précontraintes fabriquées en matériaux composites sont présentées dans l'ouvrage. Les propriétés de ces câbles et leurs avantages et désavantages par rapport aux câbles d'acier précontraints sont présentées. Les exemples des constructions existantes sont donnés pour trois types de câbles, c'est-à-dire pour câbles à fibres de verre (GFRD), câbles à fibres aramides (AFRP) et câbles à fibres de carbone (CRRP), et l'accent est mis sur les technologies et les types des produits fabriqués à fibres de carbone. Les problèmes d'ancrage et d'application de la force précontrainte sont également décrits.

A. Киндий, З. Сорич

Обзорная работа

Кабеля и ленты из сопряжённых материалов для предварительного напряжения

В работе даны основные данные о кабелях и лентах для предварительного напряжения из сопряжённых материалов. Описаны качества таких кабелей и их преимущества и недостатки по сравнению со стальными кабелями для предварительного напряжения. Для трёх типов кабелей, из стекловолокна (GFRP), арамидных волокон (AFRP) и углеродистых волокон (CFRP), наведены примеры сооружённых объектов с особым упоминанием о технологиях и видах продуктов из углеродистых волокон. Особо подчеркнута проблема установки анкеров и внесения силы предварительного напряжения.

A. Kindij, Z. Sorić

Übersichtsarbeit

Vorspannungskabel und -Bänder aus Verbundbaustoffen

Im Artikel präsentiert man die Grundangaben über Vorspannungskabel und -Bänder aus Verbundbaustoffen. Angeführt sind die Eigenschaften solcher Kabel und deren Vor- und Nachteile im Vergleich mit Stahlvorspannungskabeln. Für drei Kabeltypen, aus Glasfasern (GFRP), Aramidfasern (AFRP) und Kohlenstofffasern (CFRP) sind Beispiele von ausgeführten Bauwerken angegeben, mit besonderem Hinblick auf Technologien und Arten von Erzeugnissen aus Kohlenstoffasern. Es wird auf die Probleme der Verankerung und Einführung der Vorspannungskraft hingewiesen.

Autori: Alex Kindij, dipl. ing. grad.; prof. dr. sc. Zorislav Sorić, dipl. ing. grad., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Kačićeva 26, Zagreb

1 Uvod

Veliki nedostatak čelika za prednapinjanje jest njegova osjetljivost na koroziju. Najneugodnija je korozija uz naprezanje koja je skriveno prisutna, a može rezultirati krhkim slomom. Iz tog razloga istražuju se svojstva drugih alternativnih gradiva koji su otporniji na koroziju. Složeni materijali visoke učinkovitosti pokazala su se vrlo uspješnim. Vlačna čvrstoća složenih materijala je vrlo visoka i oni su uvelike neosjetljivi na agresivnu sredinu. Složeni materijali imaju oko 70% udjela staklenih, aramidnih ili ugljičnih vlakana promjera $5\div 25\ \mu\text{m}$ koja su vezana poliesterskom smolom (matrica). Takav proizvod naziva se polimer armiran vlaknima (*Fiber Reinforced Polymer* (FRP)).

Ako se primjenjuju složeni materijali najčešće su u uporabi žice od polimera armirane ugljičnim vlaknima (CFRP). Vlakna se proizvode postupkom izvlačenja (*poltrusion process*) i pletu se u žicu. Normirano uže $\varnothing 12,5\ \text{mm}$ ispletano je od 7 žica, gdje je svaka žica ispletana od približno 12.000 vlakana.

Vrpca (splet vlakana) se provlači kroz posudu s matricom te kroz kalup za oblikovanje i zbijanje. Kada vrpca izađe iz kalupa prolazi kroz prostoriju za njegu gdje očvršćuje. Na kraju proizvodnog procesa nalazi se uređaj za izvlačenje i eventualno namatanje. Takav postupak omogućava veliku slobodu odabira oblika elementa, tako da se proizvode žice i šipke okruglog i pravokutnog presjeka, vrpce, trake, plahte, konstrukcijski profili, mreže i sl.

Kako se FRP proizvodi sastoje od vlakana i matrice, njihova bitna svojstva ovise prvenstveno o karakteristikama i udjelu vlakana u složenom materijalu (obujamski postotak) koji iznosi od 65-70% za staklo i ugljik, te oko 35% za aramid (tablica 1.).

Uloga je matrice, osim povezivanja vlakana, prenijeti naprezanja podjednako na sva vlakna, štiti vlakna od štetnog okoliša te mehaničkih oštećenja. Matrica zapravo ima neznatnu ulogu u prijenosu vlačnih naprezanja, ali presudnu u prihvaćanju međuslojnih posmičnih naprezanja u smjeru vlakna.

Tablica 1. Pregled vlakana, matrice i veziva. [20]

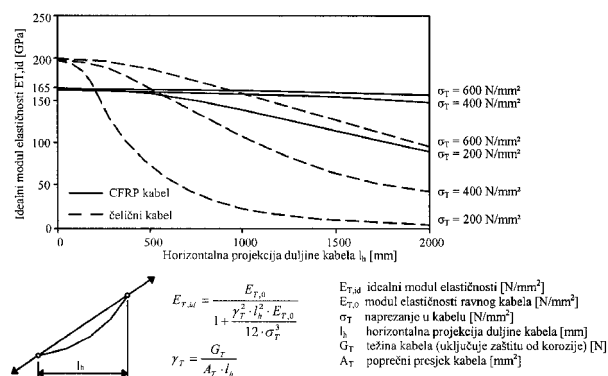
Vrsta vlakna	Oznaka	Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	Modul elastičnosti [N/mm ²]	Matrica	Oznaka	Dimenzije [mm]	Stupanj ispunjenosti (vol. %)	Obujamska masa [g/cm ³]
Staklo GFRP	E-staklo	3500	75000	poliesterska ili epoksidna smola	Polystal	$\varnothing 7,5\text{-}25,0$	68	2,1
	S-staklo	4500	87000		Bridon SM	$\varnothing 0,7\text{-}21,7$	-	-
Aramid AFRP	Twaron HM	2800	125000	epoksidna smola ili vinilesterska smola	Arapree	$3 \times 20,5 \varnothing 7,5$	36	1,25
	Kevlar 49	2650	128000		BRI-TEN	$\varnothing 1,7\text{-}12$	-	-
					Parafil G	$\varnothing 8,5\text{-}138$	-	-
Ugljik CFRP	Ugljik HP,	3200	230000	vinilesterska smola	BRI-TEN	$\varnothing 1,7\text{-}12,0$	71	1,57
	HS Karbolon	3000	230000				-	-
	Torayca T3000	3200	230000				-	-

2 Svojstva kabela od složenih materijala

2.1 Prednosti kabela od složenih materijala visoke učinkovitosti

- velika čvrstoća,
- nema korozije u agresivnim medijima, osim u slučaju običnih staklenih vlakana koja u betonu korodiraju, te su stoga potrebni posebni dodatni zaštitni slojevi, CFRP-kabeli sugljičnim vlaknima moraju se zaštititi od UV zračenja zaštitnim cijevima.
- mala vlastita težina, omjer vlačne čvrstoće i vlastite težine otprilike je pet puta veći nego kod čelika, što je posebno važno za vješaljke (zatege) visećih i ovješanih mostova.

Idealni modul elastičnosti CFRP zavješanih kabela je do duljine od 2000 m (slika 1.) gotovo konstantne veličine, dok se kod čeličnih kabela vrijednost reducira i više od 50%. Smanjena težina pojednostavnjuje i manipuliranje i montažu što je od posebne važnosti pri naknadnom ojačavanju sandučastih presjeka gdje je zbog ograničenog prostora otežano kretanje.

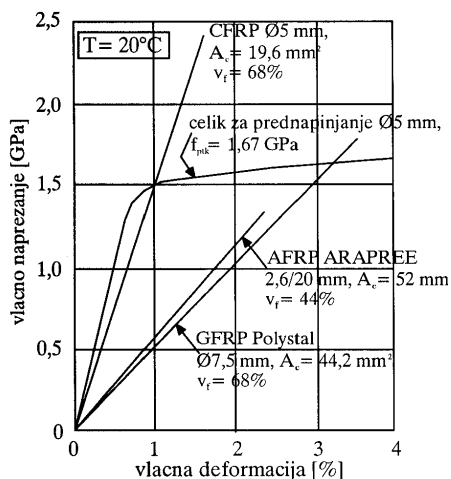


Slika 1. Idealni modul elastičnosti $E_{T, id}$ vješaljka (zatega) od čelika ili CFRP-a ovisno o horizontalnom rasponu zatege [20]

- alkalna otpornost, Alkalnu otpornost vlakana određujemo kao vrlo dobru za ugljična vlakna, zadovoljavajuću za aramidna, malu za E-staklo i dobru za AR-staklo (vidjeti 3.1).

- gotovo da nema temperaturnih deformacija, Kod miješanog prednapinjanja (čelik i složeni materijali) potrebno je računati s promjenom udjela u silu prednapinjanja zbog temperaturnih deformacija čelika.
- elektromagnetska neutralnost, u blizini željezničkih pruga dolazi do korozije čelične armature od induksijske struje. Složeni materijali su vrlo slabi vodiči pa su otporni na takvu koroziju.

Na slici 2. dani su σ - ε dijagrami raznih FRP gradiva.



Slika 2. Dijagrami σ - ε raznih FRP gradiva [20]

- veća čvrstoća na zamor ugljičnih i aramidnih vlakana (CFRP, AFRP), u vješaljka (zategama) visećih i ovješanih mostova javlja se zamor materijala, složeni materijali primjenjeni su od čeličnih.
- minimalni dugotrajni gubici (relaksacija) kabela od ugljičnih vlakana;
- ugradnja optičkih senzora, optički senzori omogućuju nadzor svakog kabela.

2.2 Nedostaci kabela od složenih materijala visoke učinkovitosti

- Visoki troškovi

Trenutačno su troškovi izrade kabela od složenih materijala otprilike tri do četiri puta veći od izrade čeličnih kabela. Masovnija proizvodnja će u svakom slučaju značajnije smanjiti troškove proizvodnje složenih materijala.

Upravo iz razloga visokih troškova proizvodnje opseg primjene složenih materijala ograničen je za sada samo na posebne slučajeve primjene, te se CFRP trake uglavnom rabe za ojačanje postojećih konstrukcija. GFRP šipke rabe se kod privremenih sidara u tlu. Kabeli za prednapinjanje i zatege zavješanih mostova dosad su se primjenjivali u relativno malom

broju slučajeva, a još rjeđe samostalno, odnosno da nisu u kombinaciji s čelikom. Takav postupak je uobičajen na početku primjene novih materijala. Može se ustvrditi da su se kabeli od složenih materijala dosad primjenjivali samo za demonstraciju, da su pokazani u primjeni, te je u budućnosti moguća i njihova samostalna primjena. Kod direktne usporedbe proizvoda od FRP-a i čelika potrebno je uzeti u obzir i visoki udio u cijeni za protukorozivnu zaštitu čelika.

Tablica 2. Prednosti i nedostaci kabela od složenih materijala visoke učinkovitosti [20]

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> • veća čvrstoća • nema korozije u agresivnim medijima • manja vlastita težina • alkalna otpornost • gotovo da nema temperaturnih deformacija; • elektromagnetska neutralnost • veća čvrstoća na zamor ugljičnih i aramidnih vlakana • minimalni dugotrajni gubici (relaksacija) kabela od ugljičnih vlakana; • ugradnja optičkih senzora 	<ul style="list-style-type: none"> • visoki troškovi • nema plastičnog područja u području sloma • osjetljivost na poprečni tlak • manji modul elastičnosti E • nepostojanje dugotrajnog iskustva u primjeni • aramidna vlakna mogu biti uništena apsorpcijom vode • slaba ili mala alkalna otpornost staklenih vlakana • nepostojanje normiranih postupaka za izdavanje dopuštenja za uporabu takvih kabela

- Nema plastičnog područja u području sloma
Nema duktilnosti. Kako bi se onemogućio krhki slom, potrebno je konstrukcije proračunavati s velikim koeficijentom sigurnosti. Iz tog razloga nije moguće ni sidrenje užadi kabela klinovima na sidru kao kod čelika. Zbog nedostatne plastične deformabilnosti kompozitnih kabela zubi klina bi izazvali krhki slom. Da bi se to izbjeglo razvijeni su novi sustavi sidrenja užadi kabela.
- Osjetljivost na poprečni tlak
Spregnuti elementi imaju malu čvrstoću poprečno na smjer prednapinjanja. Tome je potrebno posvetiti posebnu pažnju pri transportu i ugradnji. Potrebni su i posebni konstruktivni elementi za sidrenje i skretanje kabela. Nastavljanje kabela gotovo da i nije moguće.
- Manji modul elastičnosti E
Zbog manjeg modula elastičnosti GFRP i AFRP u uporabi nastaju velike deformacije. To dovodi i do većih širina pukotina.

- Nepostojanje dugotrajnog iskustva u primjeni
- Aramidna vlakna mogu biti uništena apsorpcijom vode
- Slaba ili mala alkalna otpornost staklenih vlakana
- Nepostojanje normiranih postupaka za izdavanje dopuštenja za uporabu takvih kabela.

3 Vrste kabela od složenih materijala i popis nekih izvedenih konstrukcija

3.1 Kabeli od staklenih vlakana (GFRP)

Prednost staklenih vlakana pred drugim materijalima su relativno mali trošak proizvodnje i visoka vlačna čvrstoća. Značajniji nedostaci ovog materijala su manji modul elastičnosti, visoka gustoća, velika osjetljivost na trenje, alkalna osjetljivost, mala čvrstoća na vibracije i krhki slom pri zaklinjavanju kabela u sidrima. Alkalna osjetljivost može se riješiti zaštitnim slojevima.

Rabe se dvije vrste staklenih vlakana: E-staklo (kalcij aluminijborsilikat) i S-staklo (magnezij aluminij-borsilikat). S-staklo ima veću čvrstoću od E-stakla, ali je osjetljivije na koroziju u alkalnoj sredini i skuplje je.

Kabeli od staklenih vlakana prvi put su primijenjeni 1980. na mostu *Lünen'sche Gasse* u Düsseldorfu, Njemačka. Raspon mosta iznosio je 6,55 m. Ugrađeno je šest kabela, svaki sa 6 do 8 šipki promjera $d = 7,5$ mm.

Godine 1986. u Düsseldorfu je sagrađen još jedan betonski prednapeti most s Polystal šipkama (E-staklo). Nosiva konstrukcija preko dva raspona 21,3 m i 25,6 m izvedena je kao masivna ploča debljine 1,44 m i širine 15 m, a prednapeta je sa 59 kabela promjera 7,5 mm. Sila prednapinjanja u svakom kabelu bila je 600 kN. Za kontrolu kabela ugrađeni su optički i bakreni senzori. Višegodišnje praćenje potvrdilo je sposobnost i primjenjivost kabela od staklenih vlakana.

Kabeli od staklenih vlakana primijenjeni su i na mostu *Adolf-Kiepert-Steg* u Berlin-Marienfelde (27,6 + 22,9 m), sedam vanjskih kabela svaki sa 19 šipaka promjera $d = 7,5$ mm, godina izvedbe 1988., i na mostu *Schiessbergstraße* u Leverkusenu (16,3 + 16,3 + 20,4 m), 27 kabela, godina izvedbe 1991.

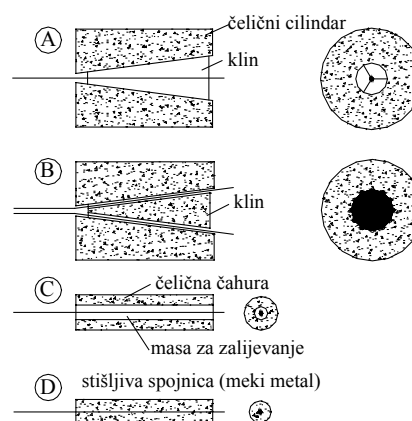
U Austriji je 1992. izveden godine most *Nötsch* preko tri raspona (13,0 + 18,0 + 13,0 m) ukupne širine 12,0 m prednapet kabelima od staklenih vlakana. Kabele od složenog materijala sačinjava 19 šipaka promjera 7,5 mm (tip Polystal sa 68% staklenih vlakana). Svaka šipka proizvedena je od oko 60.000 staklenih vlakana. Uporabno je opterećenje jednog kabela 600 kN. Kabel je vođen po paraboli. Ugrađeno je 2,59 t kompozitnih kabela, što je 6,8 kg/m³ betona, a neprednapete armature ugrađeno je 27,4 t, što je 72 kg/m³ betona.

3.2 Kabeli od aramidnih vlakana (AFRP)

Aramidna vlakna (aromatic polyamid) osjetljiva su na vlagu i UV zračenje tako da nisu pogodna za ugrađivanje u beton niti za unutarnje ili vanjsko prednapinjanje.

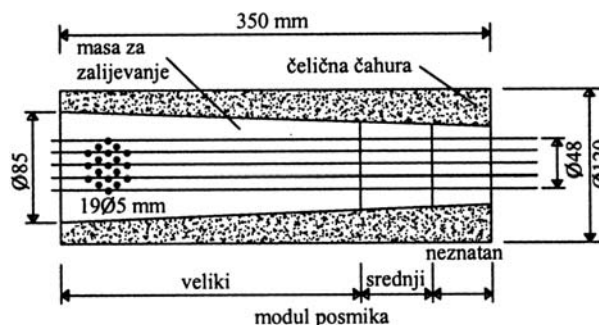
3.3 Kabeli od ugljičnih vlakana (CFRP)

Bitna je prednost ugljičnih vlakana njihova visoka vlačna čvrstoća i mala prostorna težina. Najbitniji nedostatak CFRP kabela je njihovo sidrenje. Zbog osjetljivosti na posmik i poprečni tlak za sidrenje žica kabela potrebni su posebni uređaji. Sidrenje klinovima (slika 3.)

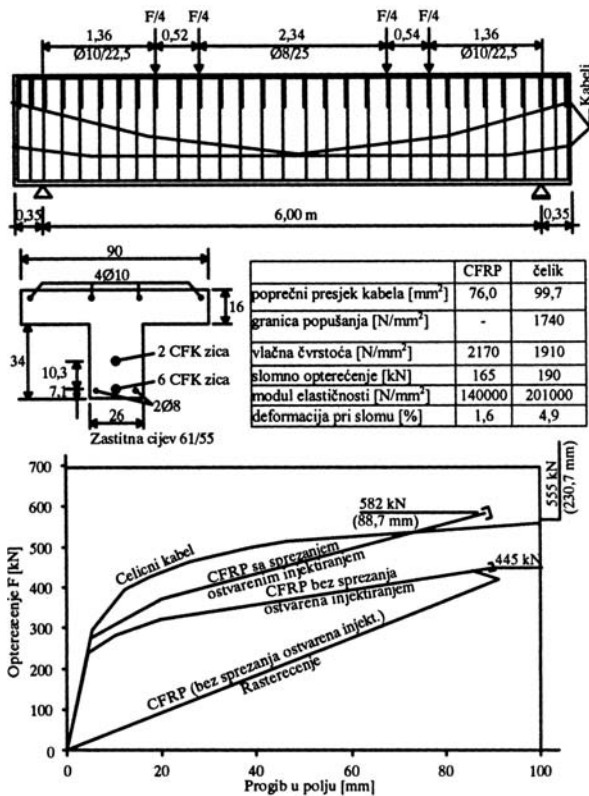


Slika 3. Sustavi sidrenja kabela (A i B – čelik, C i D – CFRP)

nije primjereno kao kod čeličnih žica kabela zbog mogućnosti krhkog sloma. Za kabele od CFRP žica najraširenija je primjena valjkastog sidrenja čeličnim čahurama. Unutarnjim nagibom čelične čahure (slika 4.) izazivaju se tlačna naprezanja okomito na smjer vlakana koja djeluju pozitivno na prionjivost. Čahura se injektira masom za zalijeвање. Ova je masa epoksidna smola s granulatom koja ima promjenjivi modul elastičnosti po dubini, tako da se duž čahure mijenja modul posmika od visokog na vrhu čahure prema neznatnom u smjeru vođenja kabela. Modul elastičnosti mase za zalijeвање raste od početka sidrenja do sredine čeličnog cilindra. Na taj se način postiže ravnomjerni prijenos sile na duljini čahure koji treba spriječiti slom kabela od preopterećenja [7].



Slika 4. Primjer sidrenja CFRP kabela s prikazom promjene modula posmika mase za zalijeвање čahure [11, 21]

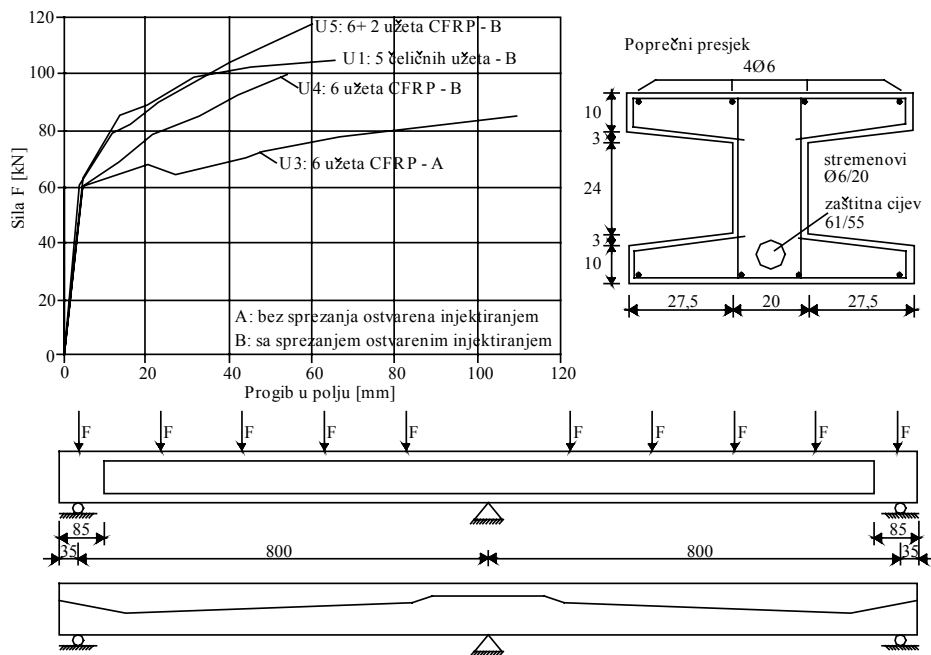


Slika 5. Slobodno poduprta greda prednapeta čeličnim i CFRP kabelima [8]

Sprega betona i CFRP kabela za prednapinjanje lošija je negoli kod primjene čeličnih kabela. Tu činjenicu je potrebno uzeti u obzir pri proračunu u граничном stanju nosivosti i граничном stanju uporabivosti (osiguranje od pojave pukotina).

Na slici 5. pokazani su rezultati ispitivanja armiranobetonске grede prednapete čeličnim kabelima s naknadnim injektiranjem zaštitne cijevi (užad 0,5") i u drugom slučaju CFRP kabelima s injektiranjem i bez injektiranja. Sila prednapinjanja P_{m0} čeličnog kabela bila je 764,4 kN, što je 70% vlačne čvrstoće. Sila prednapinjanja P_{m0} CFRP kabela bila je 668,0 kN, što odgovara 50% vlačne čvrstoće.

Omjer ploština poprečnih presjeka kabela CFRP-a i čelika iznosio je $A_{CFRP}/A_c = 76,0/99,7 = 0,76$. Neovisno o vrsti kabela prirast deformacija u odnosu na opterećenje je linearan do pojave pukotina u betonskom presjeku. Razlike se pojavljuju tek pri prekoračenju vlačne čvrstoće betona. Kod grede prednapete CFRP kabelima razaznaju se dva linearna područja koja odgovaraju pojavi pukotina. Greda prednapeta čeličnim kabelima s naknadnim injektiranjem pokazuje duktilnije ponašanje, a progib u polju takve grede pri slomnom opterećenju bio je 230,7 mm, znači 2,6 puta veći od najvećeg progiba grede prednapete CFRP kabelima sa naknadnim injektiranjem. Sila sloma (čelik) bila je 5% manja od sile sloma grede pred-



uzorak	kabel	prednapinjanje	[%] prednapinjanja	sila prednap. [kN]	opterećenje [kN]	najveći progib [mm]
U1	5 0,5" - čelik	sprezanje injektiranjem	70%	637	105	65,3
U3	6 CFRP	bez sprežanja injektiranjem	50%	501	85	110,2
U4	6 CFRP	sprezanje injektiranjem	50%	501	100	54,6
U5	6+2 CFRP	sprezanje injektiranjem	50%	(polje) 501 (ležaj) 668	119	

Slika 6. Kontinuirana greda preko dva raspana prednapeta čeličnim i CFRP kabelima [22]

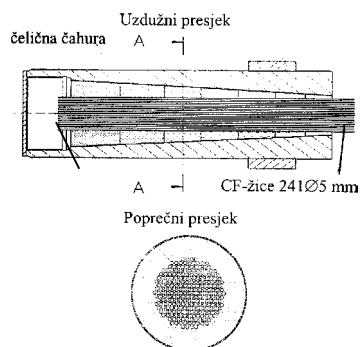
napete CFRP kabelima s naknadnim injektiranjem. Sila sloma grede prednapete CFRP kabelima bez naknadnog spreznja injektiranjem značajnije je manja od takve injektirane grede ili prednapete čeličnim kabelima i ostvarenog spreznja naknadnim injektiranjem.

Iz dijagrama (slika 5.) vidi se još jedna značajna razlika između čeličnih i CFRP kabela. Ako se greda rastereti neposredno prije dosezanja sile sloma deformiranje se vraća na nulu bez pojave trajnih deformiranja zbog potpuno elastičnog ponašanja CFRP kabela. Za čelični kabel od deformiranja, pri rasterećenju ostaje samo mali dio tzv. trajnih deformiranja.

Linearni omjer naprezanja i deformiranja CFRP elemenata i u graničnom području ne dozvoljava gotovo nikakve pre-raspodjele naprezanja kod statički neodređenih nosača. To se vidi iz navedenih rezultata ispitivanja kontinuirane grede preko dva raspona. Na dijagramu (slika 6.) prikazani su progibi grede u polju ovisno o djelovanju i vrsti prednapinjanja. Sve vrste prednapetih greda (s čeličnim i CFRP kabelima, s injektiranjem i bez njega) pokazale su duktilno ponašanje. Vrlo je ograničena sposobnost deformiranja nosača prednapetog CFRP kabelima s naknadnim injektiranjem. Na mjestu najvećih reznih sila, na srednjoj potpori, vrlo brzo dosežu se lomne deformacije i na tim mjestima dolazi do otkazivanja CFRP kabela.

3.4 Kabeli BBR (Carbon Stay Technology)

U ovoj tehnologiji prednapinjanja CFRP kabeli se sastoje od paralelno postavljene užadi. Pojedino uže ispletano je od polimernih žica armiranih ugljičnim vlaknima. Sidrenje kabela od ugljičnih vlakana zahtijeva posebna rješenja iz razloga što su sva dobra mehanička svojstva CFRP kabela u uzdužnom smjeru, a u poprečnom smjeru su slaba. Kako bi se zadržala sva mehanička svojstva i čvrstoća na zamor, razrađen je sustav sidrenja u koničnim valjcima. Problem sigurnog sidrenja kabela riješen je postupnim prirastom udjela keramičkog punila u smoli. Takav medij za prijenos sila omogućava mali modul elastičnosti na kraju sidra kako bi se izbjegla koncentracija posmičnog naprezanja.



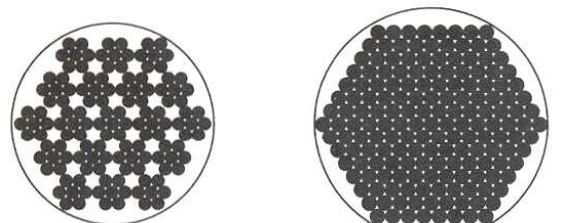
Slika 7. Primjer sidrenja CFRP kabela sa 241 užadi [13]

Ovdje se navode neki od primjera do sada izvedenih pokaznih građevina s ovom vrstom CFRP kabela:

Pješački most preko jednog raspona *Kleine Emme* kod Luzerna (Švicarska) [9] ($L = 47$ m). Rasponski sklop prednapet je sa dva kabela u donjem pojasu (svaki kabel ima 91 uže $\varnothing 5$ mm, $P_{\max} = 4800$ kN). Kao izvanredno djelovanje u proračunu moralo se provjeriti isključivanje oba kabela.

Cestovni most preko Rio di Verdasio in Intragna (Švicarska) [10]. Ovdje su prvi put za ojačanje konstrukcije primijenjena četiri vanjska CFRP kabela (svaki kabel ima 19 užadi $\varnothing 5$ mm prednapete na $65\% f_t$) što imaju skretnike nad srednjom potporom i u trećinama polja. Sedlo za skretanje sačinjeno je od zakrivljenih polovica čelične cijevi polumjera zakrivljenosti $R = 3$ m.

Zatege od CFRP-a zavješanih mostova primijenjene su na ovješnom mostu Dintelhaven, Nizozemska (slika 8.).



Čelični kabel 19Ø12,9 mm
 $F_{tk} = 19 \cdot 0,186 = 3,53$ MN

CFRP 91Ø5,1 mm
 $F_{tk} = 19 \cdot 0,0661 = 6,02$ MN

Slika 8. Presjeci užadi ovješnog mosta Dintelhaven [20]

3.5 CFK trake – njihova primjena kao vanjskih kabela (vanjsko prednapinjanje)

Već je od 1990.-ih godina poznata i prihvaćena primjena nalijepljenih CFRP traka kao naknadno ojačanje donjeg pojasa armiranobetonskih nosača. Kod tako nalijepljenih neprednapetih traka moguće izduljenje lamele za dokaz nosivosti u najpovoljnijem je slučaju (kada se dopušta $\max. \epsilon_L = 8 \text{ ‰}$) samo polovica mogućeg i zajamčenog izduljenja CFRP trake. Ograničenje izduljenja trake u osnovi proizlazi iz ograničenih mogućnosti nosivosti primijenjenog ljepila i od nedovoljne vlačne čvrstoće površinskog betona na koji se trake pričvršćuju. Kod većih izduljenja pri pokusima je primijećeno prijevremeno odljepljivanje odnosno pojava ljuštenja s površine betona. Ljuštenje pri određenom stupnju naprezanja vodi do naglog odljepljivanja cijele trake. Odljepljivanje se najjednostavnije može opisati kao otpuštanje prema načelu patentnog zatvarača.

Novija istraživanja lijepljene veze traka na površini betona zahtijevaju proširenje dokaza nosivosti i dokaza sidrenja vlačne komponente sile i između pukotina od savijanja duž cijelog vlačnog područja. Pokazano je da do

sada potreban dokaz sidrenja na kraju nije uvijek mjerodavno mjesto najnepovoljnijeg naprezanja u ljepilu. Posebno je to slučaj kod vrlo strmih gradijenata dijagrama vlačnih sila tako da je potrebno dodatno umanjiti moguće iskorištavanje izduljenja trake.

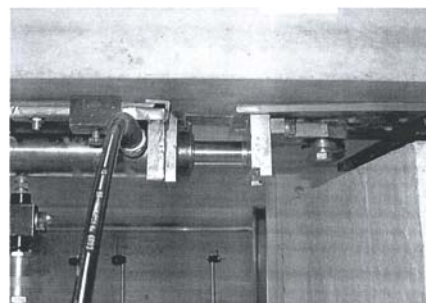
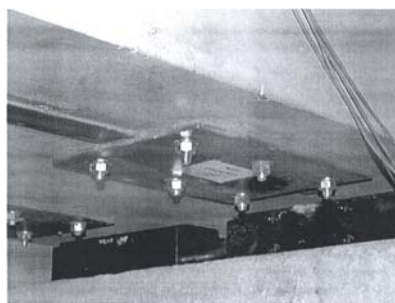
Ako se želi povoljnije iskoristiti moguću nosivost i izduljenje trake potrebno je u traku unijeti dodatno izduženje prije pričvršćivanja na nosač, odnosno prije očvršćivanja ljepila, tj. lamelu će se prednapeti. Prva istraživanja s prednapetim CFRP trakama provedena su u EMPA-i Zürich (Eidgenössische Materialprüfanstalt) 1993. godine. [14, 19] Provedena eksperimentalna ispitivanja pokazala su da se prednapinjanje CFRP traka vrlo povoljno odražava na ojačane konstrukcijske elemente. Postignuta su poboljšanja za stanje uporabe (smanjene deformacije, smanjen razvoj pukotina), ali i za stanje sloma.

Za praktičnu primjenu u gradilišnim uvjetima potrebno je razraditi primjereni postupak prednapinjanja CFRP traka. U ovome radu opisan je postupak prednapinjanja *Leoba-CarboDur*. Postupak je prvi puta (prva generacija), nakon detaljnih ispitivanja i dobivenog tehničkog dopuštenja, primijenjen pri pojačanju mosta preko rijeke Lauter kod Gomadingena, Švicarska. Razvijen je i postupak druge generacije (LC-II) primijenjen u rujnu 2001. godine pri popravku reške spojke kabela na mostu *Kör-schtalbrücke* kod Stuttgart-a, Njemačka.

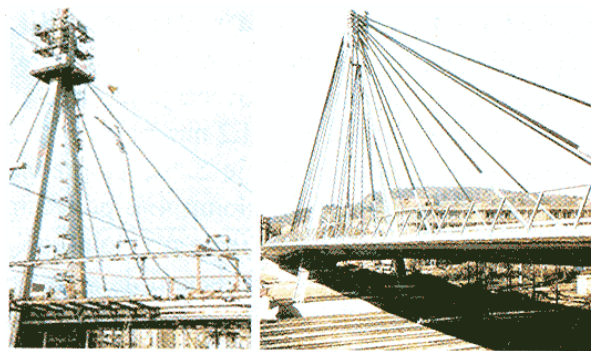
U tablici 3. je usporedba traka prve i druge generacije. A_L je ploština trake, F_u je proračunska čvrstoća, $F_{L,V}$ je sila prednapinjanja, a $\varepsilon_{L,V}$ relativna deformacija pri prednapinjanju. Povećanje sila i deformacija omogućilo je kvalitetno i za gradilišne uvjete primjenjivo sidrenje i postupak prednapinjanja.

Tablica 3. Usporedba lamela prve i druge generacije [14]

Tip	Sika CarboDur S 512	Sika CarboDur V 914
A_L [mm ²]	60	126
F_u [kN]	168	352
$F_{L,V}$ [kN]	60	165
$\varepsilon_{L,V}$ [%]	6	7,5



Slika 10. Sustav prednapinjanja. Nepomično pomično sidro i preša [19]



Slika 9. Ovešeni most Strochen u Winterthuru, Švicarska [12]

Sidrena je ploča upuštena u zaštitni sloj betona kako bi se omogućio ravnomjerniji unos koncentrirane sile. Samo sidro osigurava slom trake prije sloma sidrenja.

Nepomično sidro je čelična ploča pričvršćena na betonsku plohu, CFRP traka se nalijepi na beton ispod ploče i pritisne vijcima. Pomično je sidro izvedeno s dvije čelične ploče između kojih se pričvršćuje CFRP traka. Pomično sidro se nakon očvršćivanja ljepila uklanja.

Sustav prednapinjanja čine čelična ploča koja se pričvrsti na betonsku plohu i na njoj hidraulički cilindar. CFRP traka prije očvršćavanja ljepila klizi ispod ploče. Nakon pričvršćivanja na pomičnom sidru sustav prednapinjanja se uklanja.

Sprezanje dodatnog vanjskog elementa na osnovi ugljičnih vlakana na vlačno područje konstrukcijskog elementa koji treba ojačati izvodi se epoksidnim ljepilom. Tako se betonskoj konstrukciji armiranoj čeličnim šipkama koje su elastoplastični materijal dodaje savršeno elastični element (CFRP traka). Modeli za proračun nosivosti spregnutih konstrukcija i potrebnih duljina sidrenja traka potvrđeni su pokusima.

U stanju uporabe smanjeni su progibi i širine pukotina za elemente prednapete CFRP trakama. Zbog preraspodjele uzdužnih sila betonski poprečni presjek ostaje u neraspucanom stanju naprezanja.

Prilikom sloma utvrđeno je veliko povećanje opterećenja pri kojem dolazi do sloma i značajnije povećanje progiba. Povećanje otpornosti na slom za nenapete je

CFRP trake (50 x 1,2 mm) 14%, za prednapete CFRP trake koje imaju izduljenje pri slomu 4% povećanje je 45%, a za trake koje imaju izduljenje 6% povećanje je 71%. U drugom slučaju za CFRP trake 80 x 1,2 mm povećanje otpornosti na slom za nenapete trake je 32%, za prednapete trake koje imaju izduljenje pri slomu 4% povećanje je 82%, a za trake koje imaju izduljenje pri slomu 6% povećanje je 93%. Potrebno je napomenuti da se u slučaju traka 80 x 1,2 mm i izduljenja pri slomu od 6% nije moglo dosegnuti otkazivanje trake [23].

Proračunski model za vezu trake zalijepljene na beton zasniva se na nelinearnoj mehanici krhkog sloma i prikladan je za sve vrste laminatnih elastičnih maaaterijala. Primjenjivost modela dokazana je mnogobrojnim pokusima. Postavljaju se uvjeti ravnoteže trakama ojačanih konstrukcija kao osnova proračuna. Razvijeni su i sustavi prednapinjanja traka. Prednapinjanje traka od ugljič

nih vlakana nije jednostavan problem zbog krhkog, linearno elastičnog i anizotropnog ponašanja. Promatrane trake su prednapete za izduljenja do otprilike 7% i sile prednapinjanja od oko 120 kN. Za veća izduljenja i sile prednapinjanja promatrani sustav potrebno je dodatno razvijati.

4 Zaključak

Primjena šipaka, žica i kabela od složenih materijala (FRP) u armiranobetonskim konstrukcijama još je relativno mala. Materijal je u fazi istraživanja i za sada još nema norma, metoda proračuna i konstruiranja. U Hrvatskoj su u pojedinim slučajevima primijenjene trake od složenih materijala u ojačavanju konstrukcija, no prednapinjanje FRP-materijalima još nije primijenjeno. U budućnosti se predviđa masovnija uporaba toga materijala, poboljšanje tehnologije proizvodnje i ugradbe te pad cijena proizvoda od složenih materijala.

LITERATURA

- [1] Wolff, R.; Mießeler, H.-J.: *HLV-Spannglieder in der Praxis*. Beton Heft 2, 1989, 47-51.
- [2] Nanni, A.: *Fiber-Reinforced Concrete Structures: Properties and Applications*. Elsevier Publishers B.V., 1993.
- [3] Rostásy, F.; Buddelmann, H.; Hankers, Ch.: *Faserverbundwerkstoffe im Stahlbeton- und Spannbetonbau*. Beton- und Stahlbetonbau 87/1992., Heft 5., 123-129, Heft 6, 152-154.
- [4] Bergmeister, K.: *Vorspannung von Kabeln und Lamellen aus Kohlestofffasern*. Beton- und Stahlbetonbau 94/1999., Heft 1, 20-26.
- [5] Weiser, M.: *Erste mit Glasfaser-Spanngliedern vorgespannte Betonbrücke*. Beton- und Stahlbetonbau 2/1983, 36-40.
- [6] Wolff, R.: *Glasfaser-Verbundstäbe als Vorspannbewehrung*. Vorträge Betontag 1987., 196.
- [7] Noistering, J. F.; Meier, M.: *Zum Verbundverhalten von Vergussverankerungen für CFRP-Litzen*. Beton- und Stahlbetonbau 91/1996, Heft 4, 90-93.
- [8] Maissen, A.: *Statisch bestimmte Spannbetonträger mit Spanngliedern aus kohlestoffsdrtvverstärktem Kunststoff im Vergleich zu Stahllitzen*. Beton- und Stahlbetonbau 90/1995, Heft 8, 189-193.
- [9] Burkhardt, H.; Keller, A.; Schwegler, G.: *Stahlbetonverbund-Brücke mit CFK-Spannkabeln*. Schweizer Ingenieur und Architekt. 117. Jahrgang, 1999., 347-350.
- [10] Guidotti, N.; Keller, T.; Como, G.: *Konzentrierte umgelenkte Carbonkabel – erstmaliger Einsatz*. Schweizer Ingenieur und Architekt. 117. Jahrgang, 1999., 342-346.
- [11] Tomićić, I.: *Betonski nosači prednapeti kabelima od polimera armiranog vlaknima*. Ceste i mostovi 3-4. 2004., 44-53.
- [12] Meier, H.; Meier, U.: *Zwei CFK-Kabel für die Storchenbrücke*. Schweizer Ingenieur und Architekt. Nr.44, October 1996., 980-985.
- [13] BBR Review: *Introducing BBR Carbon Stay Technology*, November 1996.
- [14] Andrä, H.-P., König, G., Maier, M.: *Einsatz vorgespannter Kohlefaser-Lamellen als Oberflächenspannglieder*. Beton- und Stahlbetonbau 96/2001, Heft 12, 737-747.
- [15] Niedermeier, R.: *Verbundtragfähigkeit aufgeklebter Bewehrung*. München: Massivbau-Seminar 3. 1999.
- [16] Neubauer, U.: *Verbundtragverhalten geklebter Lamellen aus Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoff zur Verstärkung von Betonbauteilen*. Dissertation, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz TU Braunschweig, 2000.
- [17] Deutsches Institut für Bautechnik, Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-36.12-29. Verstärkungen von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen durch schubfest aufgeklebte Kohlefaserlamellen. Sika-CarboDur, 11.1997.
- [18] Rostasy, F., Holzenkämpfer, P., Hankers, Ch.: *Geklebte Bewehrung für die Verstärkung von Betonbauteilen*. Betonkalender 1996., Teil II, S.547-638, Berlin: Ernst & Sohn.
- [19] Deuring, M.: *Verstärken von Stahlbeton mit gespannten Faserverbundwerkstoffen*. Dissertation, EMPA Bericht 224, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Zürich, 1993.
- [20] Rombach, G.: *Spannglieder aus Faserverbundwerkstoffen*, Spannbetonbau, Ernst & Sohn Verlag, 2003., S 77 -86.
- [21] Meier, U.: *Spannglieder aus CFK. in: Massivbau 2000*. Forschung, Entwicklungen und Anwendungen, Zilch K. (Herg.), Düsseldorf 2000., S. 205-216.
- [22] Maissen, A.: *Spannbeton mit Spanngliedern aus CFK-Litzen*. Schweizer Ingenieur und Architekt. Nr.29, Juli 1997., 576-581.
- [23] Verstärken von Bauwerken mit Klebebewehrungen, Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Bauteilen mit vorgespannten CFK Lamellen, 1. Kurzbericht vom 24. September 2000., Hochschule für Technik und Architektur Freiburg

Napomena Uredništva!

Prema Hrvatskim normama umjesto kabel treba upotrijebiti izraz natega. U ovom članku je izraz kabel ostavljen, kako su ga autori upotrijebili.