

Sidrenje tkaninom armiranih mortova (TRM) i vlaknima armiranih polimera (FRP) pri pojačavanju armiranobetonskih i zidanih elemenata konstrukcija

Robert Lušo¹, prof.dr.sc. Tomislav Kišiček²

¹ Mi Projektiramo Vama d.o.o., robert@mpv.hr

² Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, kisha@grad.hr

Sažetak

Posljednjih se godina pri pojačavanju postojećih armiranobetonskih i zidanih konstrukcija primjenjuju mnoge metode pojačavanja među kojima su se istaknule one u kojima se koriste vlaknima armirani polimeri (FRP) i tkaninom armirani mortovi (TRM). Uz znatan učinak koji su pokazali ti materijali, naglasak je uglavnom na njihovim prednostima u odnosu na tradicionalne metode pojačavanja konstrukcija, međutim manje pozornosti je posvećeno načinima sidrenja FRP-a i TRM-a. Kako bi se osigurala odgovarajuća nosivost i u konačnici kvalitetnije mogle upotrijebiti navedene tehnike pojačavanja konstrukcija, potrebno je kvalitetno rješenje sidrenja kod FRP-a i TRM-a. U ovom radu pokazuju se načini sidrenja kod FRP-a i TRM-a prilikom pojačavanja armiranobetonskih i zidanih elemenata.

Ključne riječi: TRM, FRP, sidrenje, pojačavanje

Anchoring textile reinforced mortars (TRM) and fibre reinforced polymers (FRP) during strengthening of reinforced concrete and masonry structures

Abstract

Among many methods that have been used in recent years for retrofitting existing RC and masonry structures, a particular place is taken by those involving the use of fibre reinforced polymers (FRP) and textile reinforced mortars (TRM). With regard to significant performance demonstrated by these materials, the emphasis is mostly placed on their advantages compared to traditional strengthening methods, while less attention is paid to the FRP and TRM anchoring methods. To ensure proper bearing capacity and ultimately better use of these structure strengthening techniques, a quality anchorage solution is required for FRP and TRM. Anchoring methods used for FRP and TRM during strengthening of reinforced-concrete and masonry elements are presented in the paper.

Key words: TRM, FRP, anchoring, strengthening

1 Uvod

Upotreba vlaknima armiranih polimera (FRP) kao materijala za pojačavanje armiranobetonskih i zidanih elemenata, radi njihovih povoljnih svojstava (mala težina, visoka čvrstoća, otpornost na koroziju), sve se više povećava. Da bi se izbjegla neka nepovoljna svojstva koja su povezana s epoksidnim smolama, istraživači su kod postavljanja FRP-a predstavili novi koncept spajanja naprednih vlakana u obliku tekstila s anorganskom matricom, kao što su mortovi na bazi cementa. Naziv novog materijala proizlazi iz njegovih komponenti; tkaninom armirani mortovi ili TRM (eng. *textile reinforced mortars*). TRM je izuzetno obećavajuće rješenje u mnogim slučajevima kao što su pojačavanje postojećih armiranobetonskih i zidanih konstrukcija u uvjetima velike seizmičnosti, upotreba kod elemenata izloženih visokim temperaturama (bitna prednost u odnosu na FRP), kod elemenata gdje se ne može kvalitetno ugraditi FRP zbog ograničavajućih uvjeta okoline i površine na koje se primjenjuje (hladne i vlažne površine) [1].

Oba načina ojačavanja (FRP i TRM) uspješno se upotrebljavaju pri pojačavanju na savijanje i posmik armiranobetonskih elemenata, međutim preuranjeno odvajanje FRP ili TRM traka ili mreža s betonske površine ograničavaju ove tehnike. Kako bi se taj problem odvajanja spriječio ili ublažio, potrebno je omogućiti dostatno sidrenje FRP-a ili TRM-a. Postoji više načina sidrenja pri pojačavanju s kompozitnim materijalima, od kojih će se nekoliko opisati u ovom radu.

2 Metode sidrenja

2.1 Sidrenje pomoću tzv. lepezastih sidara (FRP spike anchors)

Sustavi sidrenja uključuju upotrebu čeličnih lepezastih sidara ili sidara izrađenih od FRP-a. Sidrenje čeličnim lepezastim sidrima (ova sidra su ista kao i lepezasta sidra od ugljika, samo su s čeličnim žicama) već su istraživali neki autori kao u [2]. Unatoč učinku čeličnih lepezastih sidara, takvo sidrenje ima određene nedostatke: velika težina, nekompatibilnost s kompozitnim materijalima i potreba za posebnom antikorozivnom zaštitom. Sidra izrađena od FRP-a su otporna na koroziju te se mogu upotrijebiti kod pojačanja greda, ploča, stupova, okvira i zidova. FRP sidra su izrađena od snopa ugljičnih, staklenih ili aramidnih vlakana, kod kojih se razlikuju dva dijela, prvi sidreni i drugi lepezasti. Sidra od ugljičnih i staklenih vlakana prikazana su na slici 1. Sidreni dio je preimpregnirani namotani dio u obliku šipke koji se sidri u odgovarajuće pripremljeni otvor u elementu. Lepezasti dio sidra se impregnira na mjestu ugradnje i preraspodijeli u obliku lepeze preko FRP traka ili TRM mreža, što možemo vidjeti na slici 2.

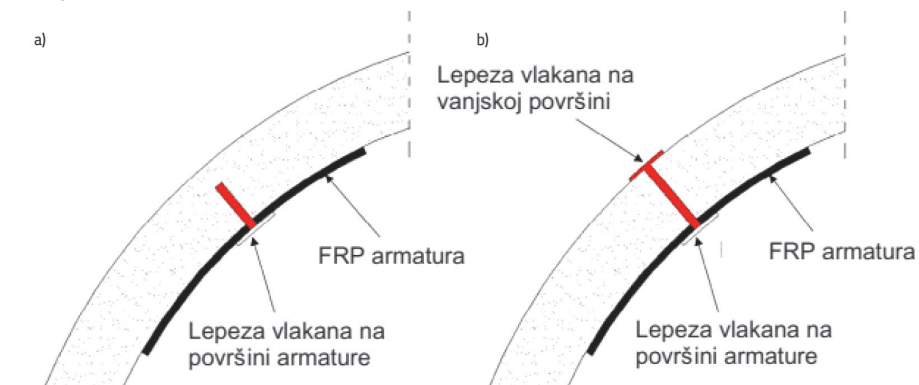


Slika 1. FRP sidra s lepezastim završetkom: a) od ugljičnih vlakana; b) od staklenih vlakana (dolje) [3]

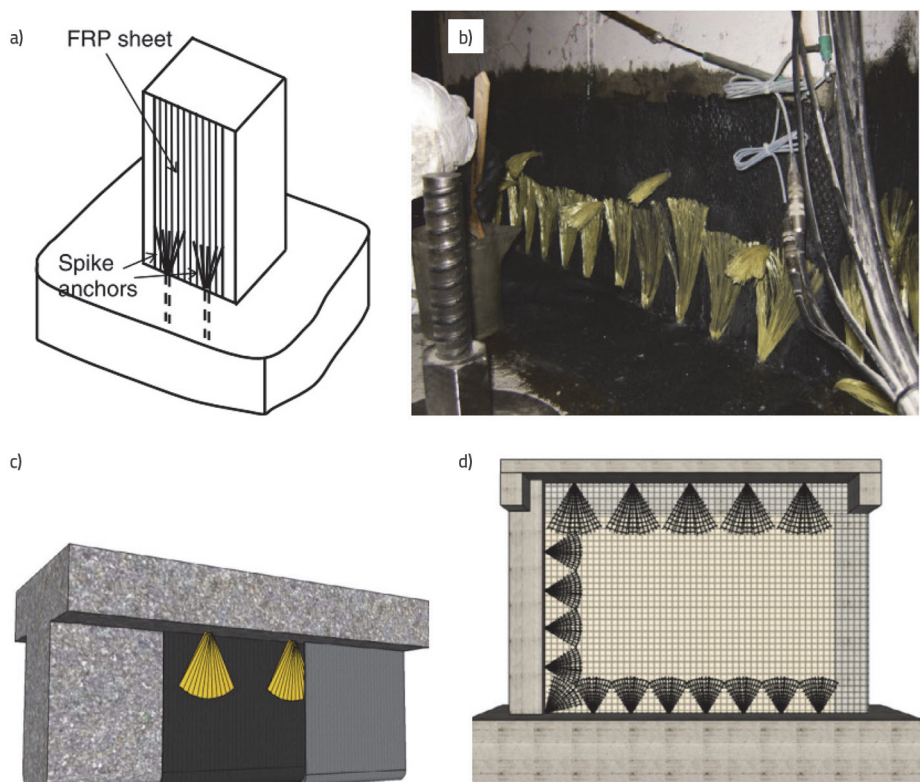


Slika 2. Pripremanje uzorka za ugljično sidro: a) impregnacija sidra; b) ugradnja ravnog dijela sidra; c) preraspodjela vlakana po uzorku

Osnovni način sidrenja FRP sidra prikazan je na slici 3.a, dok se u nekim slučajevima sidrenje provodi tako da se sidro izradi s lepezastim završetkom na oba kraja. Sidrenje takvim sidrom je prikazano na slici 3.b, postavljanje kroz element sa rasprostiranjem lepeze i sa suprotne strane ojačanja. Na slici 4. su prikazani navedeni oblici sidrenja FRP i TRM mreža sidrima od FRP-a [1].

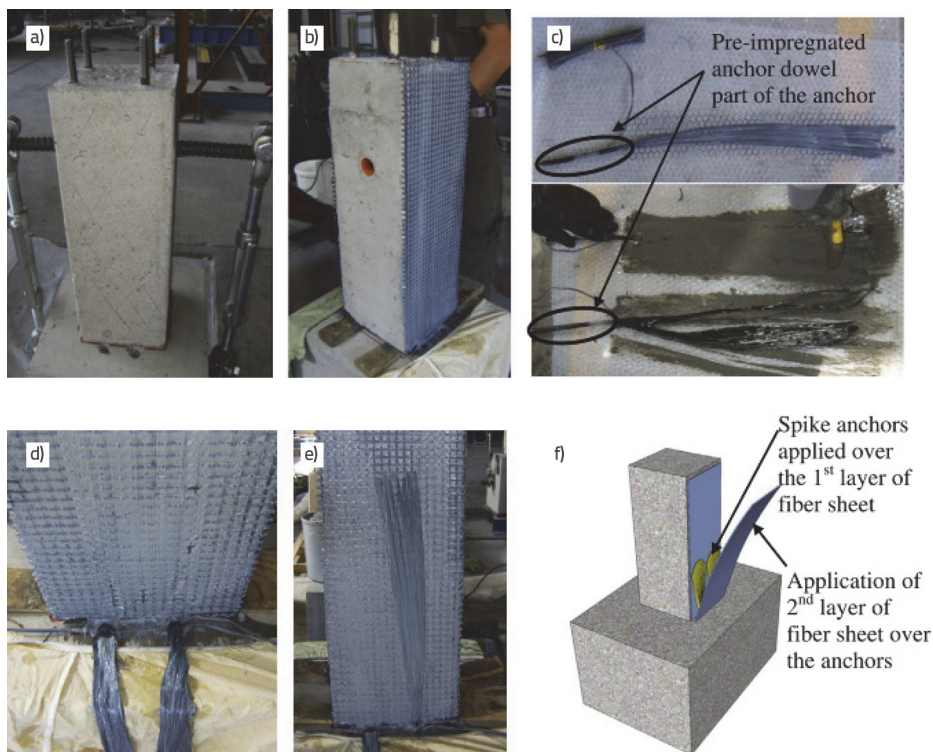


Slika 3. Načini korištenja sidara s lepezastim završetkom: a) sidrenje u otvor; b) sidrenje kroz element [3]

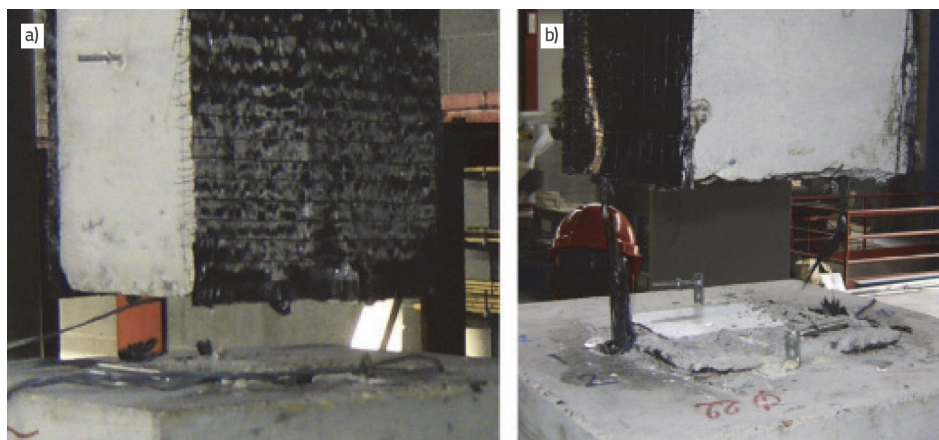


Slika 4. Primjeri postavljanja FRP sidra s lepezastim krajem: a) pojačanje armiranobetonskog stupa na savijanje lijepljenim FRP platnima (FRP sheet) u kombinaciji s FRP sidrima (Spike anchors), b) pojačanje na savijanje stupa mosta karbonskim platnima i FRP sidrima od aramidnih vlakana, c) FRP sidra kod pojačanja na posmik T-grede ovijenog hrpta, d) pojačanje armiranobetonskih okvira TRM mrežama i sidrima na bazi tekstilnih vlakana

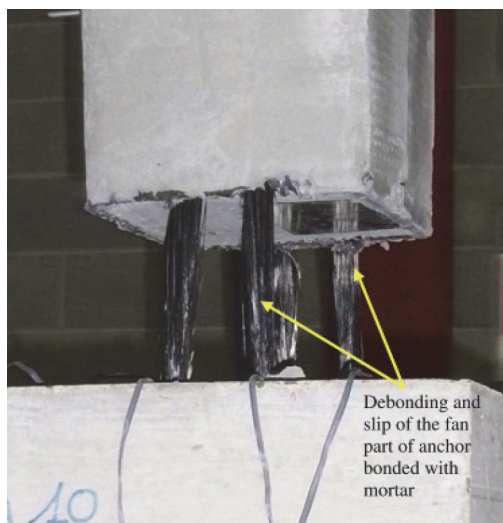
Istraživanje na FRP sidrima s lepezastim završetkom provelo je samo nekoliko autora: Ozdemir i Akyuz [3], Ozbakkaloglu i Saatcioglu [8], Kim i Smith [9]. Ozdemir i Akyuz provjeravali su vlačnu čvrstoću ankera ugrađenih u beton uz određene parametre (dubina sidrenja, veličina rupe u koju se sidri, količina sidrenih vlakana, tlačna čvrstoća betona). Zaključili su da je iznimno značajna dubina sidrenja i količina sidrenih vlakana. Bournas sa suradnicima [1] prvi put ispituje vlačnu čvrstoću FRP sidrenih ankera s lepezastim završetkom postavljenim preko slojeva FRP ili TRM platna. Na slici 5. je prikazan način ojačanja stupova FRP sidrima u području spoja s temeljem. Na slikama 6. i 7. prikazani su načini otkazivanja kod navedenog načina sidrenja.



Slika 5. Povezivanje FRP sidra na spoj AB stupa s temeljem: a) odgovarajuće pripremljen uzorak prije pojačavanja; b) lijepljenje prvog sloja mreža od ugljičnih vlakana (epoksidnom smolom ili mortom); c) impregnacija snopa ugljičnih sidra epoksidnom smolom i mortom; d) postavljanje ugljičnih sidra u sidrene otvore u temelju; e) postavljanje sidrenih vlakana preko ugljičnog platna u obliku lepeze; f) lijepljenje zadnjeg sloja mreža od ugljičnih vlakana preko lepeze sidra



Slika 6. Otkazivanje sidra uslijed vlačnog izvlačenja: a) sidra: 4Φ6; b) sidra: 1Φ12

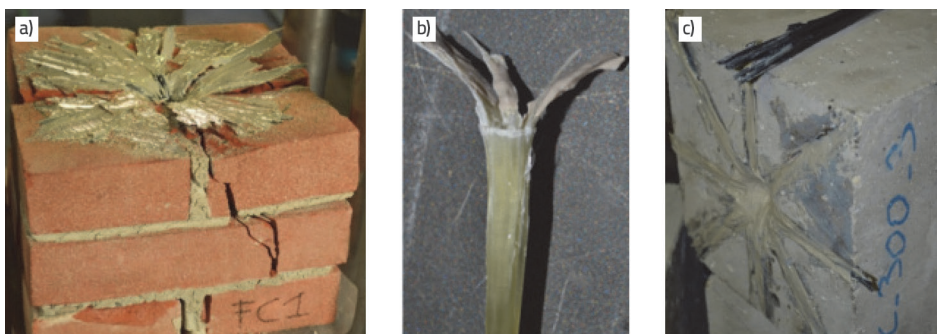


Slika 7. Otkazivanje sidara uslijed odvajanja i izvlačenja ugljičnih sidara (2Φ9) lijepljenih mortom od TRM platna

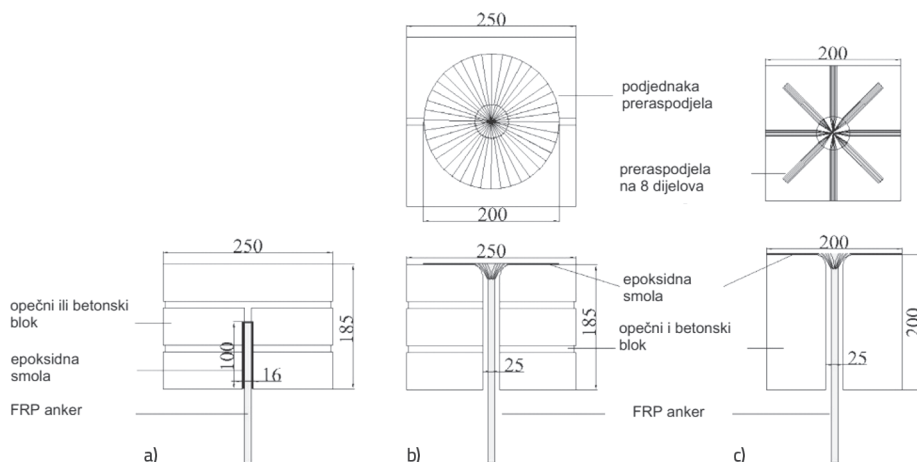
Istraživanja Bournasa i suradnika [1] pokazala su da je uporaba ugljičnih FRP sidara učinkovit način u sprječavanju preranog odvajanja FRP i TRM platna od površine betona. Ako su dobro usidrena u beton i povezana FRP platnom na površini elementa, sidra otkazuju uslijed vlačnog izvlačenja. Ako se broj vlakana u sidru udvostruči i ako se radi o sidrenju FRP-a, dobiva se povećanje vlačne čvrstoće do 70 %, dok kod sidrenja TRM-a povećanje iznosi 50 % pri korištenju identičnih sidara. Unatoč ograničenom broju uzoraka ispitanih u radu [1], svi rezultati upućuju na to da je sidrenje sidrima od FRP-a obećavajuće rješenje za sprječavanje preuranjenog odvajanja lijepljenih FRP ili TRM sustava pojačanja.

Carozzi sa suradnicima [4] ispitivao je vlačnu vezu između CFRP i GFRP sidara i uzorka od betona i opeke. Ispitivanje je provedeno na ukupno 53 uzorka, od čega je na 22 uzorka ispitivanje provedeno s usidrenjem FRP sidara u uzorke od opeke i betona te na 31 uzorku od opeke i betona sidrenjem FRP sidrima s lepezastim završetkom. Kod svih uzoraka sastavljenih od CFRP i GFRP sidra ugrađenog u opeku došlo je do otkazivanja slomom opeke. Pri ispitivanju na betonskim uzorcima pojavljuju se dva mehanizma sloma. Prvi je otkazivanje sidra pri dnu slobodnog dijela sidra, a drugi odvajanje od uzorka. Uzorci od opeke s postavljenim lepezastim sidrima pokazali su dva različita načina otkazivanja, ovisno o mehaničkim svojstvima uzoraka. Uglavnom su to otkazivanja uslijed odvajanja lepezastog sidra od uzorka i puknuće sidra na slobodnom kraju. Kod uzoraka od pjeskarene opeke s lošijim mehaničkim svojstvima i mortom na bazi vapna došlo je do odvajanja vlakana lijepljenih na površini te slom uzorka. Kod uzoraka od opeke povezanih cementnim mortom, boljih meha-

ničkih svojstava, došlo je do otkazivanja uslijed pucanja sidra pri slobodnom kraju. U tim slučajevima do otkazivanja ne dolazi zbog svojstava uzorka, nego se javlja pri kraju slobodne dužine zbog puknuća sidra. Kod uzoraka izrađenih od betonskih blokova otkazivanje se javlja zbog puknuća sidra na kraju slobodne dužine (slike 8. i 9.).



Slika 8. Načini otkazivanja sidra sa lepezastim završetkom: a) odvajanje od uzorka; b) puknuće sidra pri kraju slobodnog dijela; c) puknuće sidra pri kraju slobodnog dijela kod betonskog uzorka



Slika 9. Postavljanje sidra na testnim uzorcima: a) sidro fiksirano u bloku; b) sidro podjednako raspodijeljeno na površini; c) sidro raspodijeljeno u 8 jednakih dijelova [3]

Iz navedenog istraživanja konačno se može zaključiti da se preraspodjela vlakana sidra u obliku zvijezde s osam krakova pokazala kao najbolja (slika 9.c), s eksperimentalnom čvrstoćom prijanjanja približno vlačnoj čvrstoći. Također je kod svih ispitanih uzoraka očito da je postupak vrlo osjetljiv na ručnu pripremu zbog koje su rezultati dosta raznoliki.

2.2 Sidrenje pri pojačanju na posmik armiranobetonskih T-greda TRM-om

Istraživanje koje su proveli Tetta, Koutas, Bournas, u [5] prikazuje pojačanje armiranobetonskih greda T-presjeka tkaninom armiranih mortova i sidara na bazi tkanine te usporedbu sa sidrenjem pomoću ovijanja hrpta u obliku slova "U". Ključni parametri su upotreba sidara na bazi tkanine kao sidrišta ovijenog hrpta (sidra s lepezastim krajem), broj slojeva TRM-a, geometrija tkanine, materijal tkanine (dvije tkanine od ugljičnih vlakana i tkanine sa staklenim vlaknima), učinkovitost ekvivalentnog FRP ovijanja za slučaj bez sidara. Grede su statički bile opterećene u tri točke: jedna je testirana nepojačana, dok je ostalih deset pojačano prije ispitivanja. Osnovni zaključci tog istraživanja su sljedeći: upotreba sidra na bazi tkanine drastično povećava učinkovitost tehnike ovijanja ugljičnim TRM-om u obliku slova "U". Potpuno sidrenje slojeva TRM-a od ugljičnih vlakana poboljšalo je učinkovitost ovijanja 98 % - 148 %, ovisno o broju TRM slojeva i geometriji tkanine. Ako je TRM odgovarajuće sidren, mogu se postići visoke efektivne deformacije koje variraju od 3,24 % do 5,21 % (ovisno o količini slojeva TRM-a i količini sidara). Nasuprot tome, kod ovijanja bez sidrenja vrijednosti variraju 2,03 % do 2,58 %. Sidrenje dvaju slojeva TRM-a od ugljičnih vlakana gotovo je ekvivalentno postavljanju četiri sloja TRM-a od ugljičnih vlakana bez sidrenja, što rezultira značajnim uštedama. Može se zaključiti da je ovijanje TRM-om jednako učinkovito kao i FRP-om pri povećanju nosivosti na posmik kod armiranobetonskih T-greda, [5].

Niemitz i dr. [6] ispitivali su učinkovitost CFRP sidra pri opterećenju na posmik armiranobetonskih blokova armiranih CFRP platnima. Otkrili su da je upotreba FRP sidra u kombinaciji sa FRP lijepljenim platnima održiva tehnika te su proučili učinkovitost FRP sidara u odnosu na njihove geometrijske karakteristike.

Upotrebu lepezastih sidara kod zidanih konstrukcija prikazali su Bori i dr. [7], tako što su upotrijebili FRP sidra kod zidanih lukova ojačanih GFRP trakama ili CFRP pločama. Uočeno je da se upotrebom lepezastih sidara može spriječiti preuranjeno odvajanje pojačanja od površine luka. Nije zabilježena smanjena nosivost zbog bušenja rupa za postavljanje lepezastih sidara.

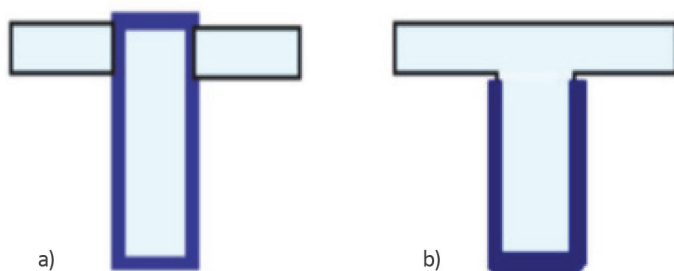
2.3 Ostali oblici sidrenja kod FRP-a i TRM-a

Da bi se moglo kontrolirati preuranjeno otkazivanje pojačanja, rub FRP ili TRM platna mora biti sidren. Postoji više načina sidrenja uz one već navedene, pri kojem pojačanje dostiže potpuno kompozitno djelovanje i sprječava otkazivanje uslijed odvajanja od elementa.

Melo, Araujo i Nagato u [11] prikazuju da se u slučaju potpunog ovijanja elementa tkaninom od ugljičnih vlakana, kako je prikazano na slici 10.a, posmična čvrstoća povećava za 106 %. Međutim, Al-Mahaidi i Kalfat u [12] navode kako potpuno ovijanje ima ograničenu uporabu. Kod potpunog ovijanja potrebno je bušiti otvore u

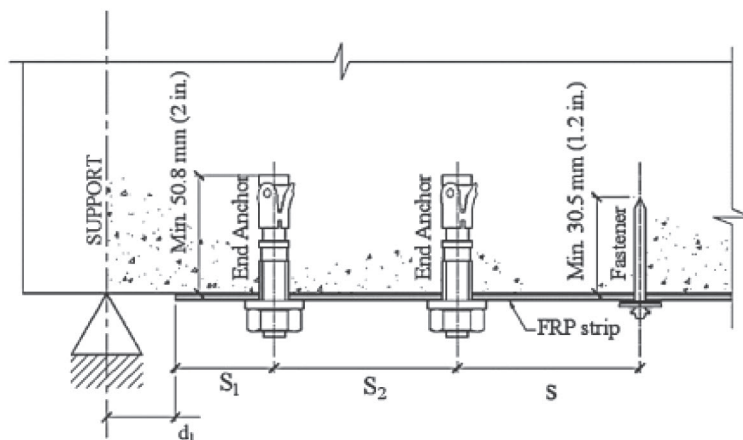
betonskom elementu kako bi se mogao oviti cijeli element, što utječe na njegovu cjelovitost.

Al-Amery i Al-Mahaidi u [13] ispituju šest armiranobetonskih greda pojačanih ugljičnim FRP lamelama u više slojeva, sidrenih trakama od ugljičnih vlakana ovijanjem u obliku slova "U", kako je prikazano na slici 10.b. Zaključili su da je čvrstoća na savijanje povećana za 95 % u odnosu na povećanje od 15 % u slučaju bez sidrenja ovijanjem.



Slika 10. Sidrenje ovijanjem trakama od ugljičnih vlakana: a) potpuno ovijanje, b) ovijanje u obliku slova "U"

Sidrenje FRP i TRM platna može se provesti mehaničkim pričvršćenjima (vijcima ili čeličnim vilicama). Upotrebom vijaka pri sidrenju platna (slika 11.) postiže se povećanje nosivosti greda više od 50 % u odnosu na upotrebu FRP sidara. Oštećenje se pojavljuje uslijed posmičnih pukotina lociranih pored vijaka, [10].



Slika 11. Sustav mehaničkog sidrenja vijcima

3 Zaključak

Dosadašnja istraživanja provedena na raznim načinima sidrenja FRP-a i TRM-a pokazala su određene rezultate, međutim na ograničenom broju uzoraka. Istraživanja se uglavnom provode uzimajući u obzir nekoliko parametara koji nisu dostatni da bi se mogli definirati potpuno sigurni modeli proračuna koji bi projektantima dali mogućnost projektiranja pojačanja konstrukcija. Odgovarajuće sidrenje je jedan od ključnih parametara pri pojačavanju postojećih armiranobetonskih i zidanih elemenata. Prema tome, mora se uložiti dodatni napor pri definiranju analitičkih modela sidrenja uzimajući u obzir utjecaj više parametara kao što su optimalan broj i raspored sidara, kut ugradnje sidra, vrsta TRM-a koji se sidri, količina slojeva tkanine, karakteristika tkanine. Potrebno je provesti i dodatna eksperimentalna istraživanja u svrhu boljeg razumijevanja ponašanja sidara pri različitim vrstama opterećenja. Osim toga, treba posebno istaknuti učinkovitost sidrenja koja su pojačana FRP-om i TRM-om pri visokim temperaturama.

Daljnje istraživanje potrebno je usmjeriti na analizu prijenosa naprezanja (sile) sa sidra na FRP traku ili tkaninu, jer najčešće otkazivanje je izvlačenje sidra kao rezultat nedovoljnog preklopa s pojačanjem koje se sidri kao i načina postavljanja lepeze sidra u odnosu na FRP ili TRM materijal. Također je istraživanjem potrebno usmjeriti na analizu duljina sidrenja ovisno o vlačnoj čvrstoći FRP sidra, promjera sidra, te što je najvažnije odnosa promjera sidra i rupe u koju se postavlja, kao i udaljenosti od ruba betona i same kvalitete betona. Danas u primjeni čeličnih kemijskih sidara koji su analogni FRP sidrima kod betona, su dani izrazi ovisno o mehanizmu sloma, kao i detaljni opisi njihove izvedbe od promjera rupe u koju se ugrađuje, načina ugradnje sidra, debljine epoksi ljepila kao i udaljenosti od ruba betonskog presjeka. Realno za FRP sidra nema izraza za proračunsku otpornost kao niti propisane duljine preklopa s obzirom na pojačanje koje se sidri. U praksi se uglavnom propisuje postupak ugradnje i prethodna ispitivanja čupanjem, pa prema postignutim silama korigira se broj sidara.

Važno je istaknuti da problematika sidrenja postoji koliko i primjena FRP-a, a lepeza sidra se primjenjuju skoro 10 godina u Hrvatskoj. Za sada se ta primjena temelji na inženjerskoj analogiji s klasičnim armaturnim ankerima za sidrenje čelične armature, kao i S-kuka za povezivanje. Ključno je u budućem istraživanju pokušati numerički definirati nosivost i učinkovitost tih sidrenja o ključnim parametrima kao što je duljina preklopa, dubina sidrenja i sl.

Literatura

- [1] Bournas, D.A., Pavese, A., Tizani, W.: Tensile capacity of FRP anchors in connecting FRP and TRM sheets to concrete, *Article in Engineering Structures*, 82 (2015), pp. 72-81.
- [2] Prota, A., Manfredi, G., Balsamo, A., Nanni, A., Cosenza, E.: Innovative technique for seismic upgrade of RC square columns. *Proceedings of the 7th International Symposium: fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcement for concrete structures*, SP- 230, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, pp. 1289-304, 2005.
- [3] Ozdemir, G., Akyuz, U.: Tensile capacities of CFRP anchors. *Advances in earthquake engineering for urban risk reduction. Nato science series: IV: Earth and environmental sciences*. Netherlands: Springer, pp. 471-487, 2006.
- [4] Carozzi, F.G., Colombi, P., Fava, G., Poggi, C.: Mechanical and bond properties of FRP anchor spikes in concrete and masonry blocks, *Composite Structures*, 18 (2018), pp. 185-198.
- [5] Tetta, Z.C., Koutas, L.N., Bournas, D.A.: Shear strengthening of full-scale RC T-beams using textile-reinforced mortar and textile-based anchors, *Composites Part B* 95, pp. 225-239, 2016.
- [6] Niemitz, C.W., James, R., Brena, S.F.: Experimental behavior of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets attached to concrete surfaces using CFRP anchors, *ASCE J Comp Constr*, 14 (2010) 2 pp. 185-94.
- [7] Borri, A., Castori, G., Corradi, M.: Intrados strengthening of brick masonry arches with composite materials, *Compos Part B* 42, pp. 1164-1172, 2011.
- [8] Kim, S.J., Smith, S.T.: Pullout strength models for FRP anchors in uncracked Concrete, *ASCE J Comp Constr*, 14 (2010) 4, pp. 406-414.
- [9] Ozbakkaloglu, T., Saatcioglu, M.: Tensile behavior of FRP anchors in concrete, *ASCE J Comp Constr*, 13 (2009) 2, pp. 82-92.
- [10] Baiuk, A.A.: PhD. thesis: Improving bond strenght for CFRP-RC beams interface, pp. 19-23, 2016.
- [11] Melo, G., Araujo, A., Nagato, Y.: Strengthening of RC T-beams in shear with carbon fibre sheet laminates (CFRP), u FRPRCS-6, fibre reinforced polymer reinforcement for concrete structures, Singapore: World Scientific Publishing Company, 2003.
- [12] Al-Mahaidi, R., Kalfat, R.: Investigation into CFRP plate end anchorage utilising uni-directional fabric wrap, *Composite Structures*, 93 (2011) 2, pp. 821-830, 2011.
- [13] Al-Ameri, R., Al-Mahaidi, R.: Coupled flexural-shear retrofitting of RC beams using CFRP straps. *Composite Structures*,. 75 (2006) 1-4, pp. 457-464.