

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.15>

Tkaninom armirani mortovi (TRM) kao tehnika pojačavanja AB konstrukcija

Martina Carić

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski Fakultet
kontakt: mcarić@grad.hr

Sažetak

Posljednjih se godina za pojačanja konstrukcija istražuju tkaninom armirani mortovi (TRM). To su kompoziti koji se sastoje od vlakana (staklenih, ugljičnih, bazaltnih, PBO) i anorganske (cementne) matrice. Nastali su iz potrebe za rješavanjem nedostataka epoksidne matrice kod vlaknima armiranih polimera (FRP-a). Anorganska matrica ima veći toplinski kapacitet, a ponašanje elementa u vlaknu nije linearno elastično. Snopovi vlakana su formirani u mreže kako bi se ostvarila povezanost s matricom. Provedeno je više istraživanja pojačanja armiranobetonskih i zidanih konstrukcija, a u ovom radu prikazana su pojačanja armiranobetonskih (AB) ploča, greda i stupova. Istaknuti su parametri koji utječu na učinkovitost kompozitnog djelovanja, a time i učinkovitost pojačanja te ponašanje pojačanih elemenata.

Ključne riječi: TRM, pojačanja, AB, vlakna, mort, tkanina

Textile reinforced mortars (TRM) as strengthening technique for reinforced concrete structures

Abstract

In the last years, textile reinforced mortars (TRM) have been studied for the strengthening of structures. TRM are composites made of fibres (glass, carbon, basalt, PBO) embedded in inorganic (cementitious) matrix. They have been developed due to fibre reinforced polymers (FRP) epoxy matrix's disadvantages. Inorganic matrix has higher thermal capacity and tensile behavior of material is non linear elastic. Fibre rovings form fabric grids in order to achieve the bond with the matrix through penetration of mortar through the fabric. Several studies have been carried out on the strengthening of reinforced concrete and masonry structures. Strengthening of reinforced concrete (RC) slabs, beams and columns is presented in this paper. Parameters that affect the effectiveness of composite action, and thus the effectiveness of strengthened elements are highlighted.

Keywords: TRM, strengthening, RC, fibres, mortar, textile

1 Uvod

U današnje vrijeme, osim izgradnje novih konstrukcija, sve je veća orijentacija inženjera na projekte sanacija i rekonstrukcija, s obzirom na strože zahtjeve normi čije uvjete starije građevine ne mogu ispuniti i s obzirom na dotrajalost i mehanička oštećenja. Jedna od dosta proučavanih i primjenjivanih tehnika pojačanja konstrukcija je upotreba FRP-a, koji se sastoje od armaturnih vlakana (staklenih, ugljičnih, aramidnih) povezanih polimernom matricom (najčešće epoksidnom smolom). Uz brojne prednosti koje ovaj tip kompozita ima, postoje nedostaci koji se najviše vežu uz svojstva matrice: loše ponašanje epoksida pri visokim temperaturama, nemogućnost nanošenja smola pri niskim temperaturama i na mokrim podlogama, manjak paropropusnosti, nekompatibilnost epoksida i podloga na koje se nanosi, visoka cijena epoksida te, kao glavni nedostatak, linearno elastično ponašanje takvih kompozita do sloma [1].

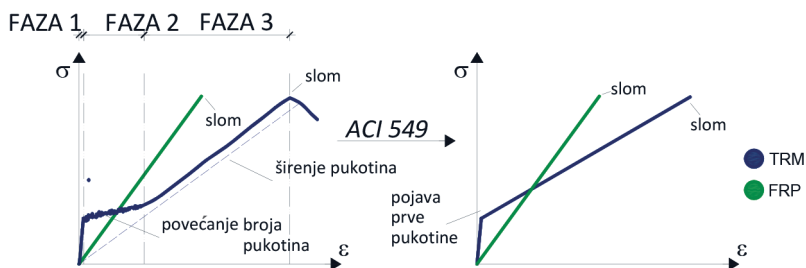
Zamjena organskog veziva anorganskim (npr. cementnim mortom) dovodi do upotrebe tkaninom armiranih mortova (eng. *textile reinforced mortars* - TRM; *mineral based composites* - MBC; *textile reinforced concrete systems* - TRC), kao rješenje navedenih problema kod epoksidne matrice. Anorganska matrica ima veći toplinski kapacitet i kompatibilnija je s betonom i žiđem, podlogama koje se pojačavaju. TRM kompoziti sastoje se od snopova vlakana raspoređenih u jednom ili više smjerova (najčešće ortogonalno) i anorganske matrice. Vlakna, koja mogu biti staklena, ugljična, bazaltna ili PBO – Zylon ili poly (p - phenylene - 2,6 - benzobisoxazole, preuzimaju vlačna napreznja, a matrica štiti vlakna i prenosi napreznja s podloge na vlakna. Prema tome, ovisno o vrsti vlakana, postoji GTRM, CTRM, BTRM i PBOTRM. Prianjanje između vlakana i matrice postignuto je mehaničkim uklinjavanjem koji je rezultat prodiranja morta kroz razmake u mreži. Trake od polimernih vlakana nisu povoljno rješenje jer se ne može ostvariti veza između morta i vlakana [2].

Posljednjih dvadesetak godina provedeno je više istraživanja pojačanja armiranobetonskih elemenata te seizmička obnova zidanih konstrukcija te armiranobetonskih okvira s ispunom. Dosadašnja istraživanja pokazuju zadovoljavajuće rezultate, što je i razlog sve većeg broja istraživača na ovom području. Glavni aspekti pojačanja armiranobetonskih ploča, greda i stupova prikazani su u ovom radu.

2 Svojstva TRM kompozita

TRM kompoziti se postavljaju slično kao i FRP kompoziti, ručnim polaganjem (eng. *hand lay-up method*), na način da se prvo brušenjem ili pjeskarenjem pripremi površina koja se pojačava, te se nanese prvi sloj morta. Potom se nanosi sloj mreže te ponovo sloj morta. Postupak se može ponavljati ako se želi postići veći broj slojeva. Svaki sloj morta mora se nanijeti dok je prethodni sloj još svjež [2].

S obzirom na to da je primarna funkcija pojačanja preuzimanje vlačnih naprezanja, potrebno je ispitati ponašanje vlačno opterećenog TRM-a. Za razliku od linearno elastičnog FRP-a, na radnom dijagramu TRM-a mogu se uočiti tri faze [3], s prijedlogom pojednostavljenja kao bilinearnog [4] (slika 1.). Prva faza, također linearno elastična, traje do pojave prve pukotine, a vlačna naprezanja primarno preuzima matrica. U drugoj fazi se broj pukotina povećava, i krutost kompozita je smanjena. Nakon što se slika pukotina stabilizira, kompozit je u trećoj fazi koja traje do otkazivanja, a krajnja čvrstoća i modul elastičnosti najviše ovise o svojstvima tkanine.



Slika 1. Radni dijagram vlačno opterećenog TRM-a i pojednostavljenje prema ACI 549

Kako bi se osiguralo kompozitno djelovanje i samim time vlakna što više iskoristila, potrebno je ostvariti dobru vezu među vlaknima, vezu vlakana i matrice među kojima postoji mogućnost proklizavanja, što nije moguće kod FRP-a, te vezu matrice i podloge. Složenost mehanizma prijenosa opterećenja, široki raspon vrsta i gustoće vlakana te vrsta i debljina mortova kod ovakvih pojačanja uzrokuje nekoliko mogućih načina otkazivanja TRM-a: odvajanje na površini tkanine i matrice praćeno proklizavanjem i deformacijom snopova vlakana, proklizavanje tkanine unutar matrice, odvajanje kompozita od podloge koja se pojačava te slom tkanine u matrici [5, 6].

3 Pojačanja AB ploča, greda i stupova

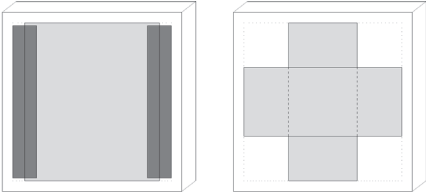
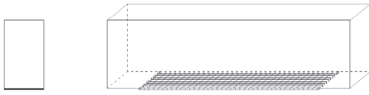
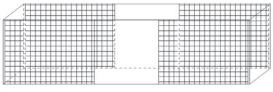
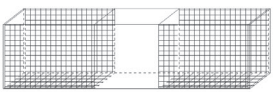

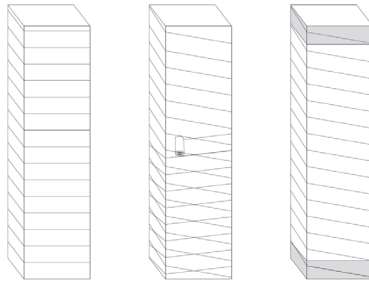
U tablici 1. prikazane su konfiguracije pojačanja AB ploča na savijanje, greda na savijanje i posmik te stupova na uzdužnu silu i savijanje. Za pojačavanje ploča može se postaviti TRM kompozit na cijeloj vlačnoj površini mreže, s preklapima ako to dimenzije ploče zahtijevaju, ili se može postaviti na efektivnim širinama na područjima većih momenata savijanja. Ispitivanjem je pokazano da je bolje ponašanje uzorka sa slojem kompozita po cijeloj površini u pogledu nosivosti, ali vlakna u glavnom smjeru su bolje iskorištena u križnoj konfiguraciji uzrokujući veće deformacije i krutost nakon pojave pukotina [7]. Pri pojačanju greda na savijanje, bolja učinkovitost ojačanja bila je kod greda s jednim slojem na vlačnom području i jednim U-slojem. Pri tome poja-

čanje nije otkazalo odvajanjem na površini beton – matrica, nego kod greda sa dva sloja na vlačnoj površini, kad je pojačanje otkazalo klizanjem tkanine u matrici [8]. Kao dodatno sidrenje mogu se postaviti i U slojevi na krajevima koji mogu povećati čvrstoću, a i promijeniti način otkazivanja, naročito ako se slom događa u tim područjima [8]. Kod pojačanja greda na poprečnu silu razlikuju se bočno postavljanje (eng. *side bonding* - SB), U-omatanje (eng. *U-wrapping* - UW) i puno omatanje (eng. *full-wrapping* - FW), pri čemu je najučinkovitiji FW, ali najrjeđe primjenjiv zbog položaja greda u konstrukcijama. Također, TRM se može postaviti konvencionalno tj. na način da se tkanina postavi u smjeru okomitom na uzdužnu os grede, ili spiralno, pod nekim kutom u odnosu na os grede. Pri ispitivanju s manjim brojem slojeva nije bilo razlika u učinkovitosti konfiguracija [9], dok je pri većem broju slojeva spiralna konfiguracija imala veću čvrstoću [10]. Mehaničko sidrenje kompozita u grede T-presjeka, usidrenim sa zakrivljenim čeličnim presjecima i vijcima, a povećava čvrstoću uzorka, to više što je razmak vijaka manji [11]. Da bi se izbjegla upotreba čelika, sidrenje se može izvesti i snopovima vlakana koji se premažu epoksidom i postave u prethodno izbušene rupe te naknadno injektiraju. Stupovi se također mogu omotavati konvencionalno, u smjeru okomitom na uzdužnu os stupa, ili spiralno, pod nekim kutom u odnosu na os. Spiralno omotavanje pokazalo se manje učinkovitim od konvencionalnog, a spiralno omotavanje pod kutom od 45° manje učinkovitim od onog pod kutom od 30° [12]. TRM pojačanja stupova mogu biti lijepljena cijelom duljinom ili samo na krajevima. U [13] oba primjera imala su jednak način otkazivanja jer se slom dogodio daleko od mjesta sidrenja.

Osim konfiguracije pojačanja, za njihovu učinkovitost važan je i odabir vlakana. PBO kompoziti imaju veću nosivost, duktilnost i apsorpciju energije od ugljičnih, te su grede ojačane PBO-TRM-om otkazale na površini beton – matrica, dok su grede ojačane CTRM-om otkazale proklizavanjem tkanine u matrici. Bazaltna vlakna imala su manju učinkovitost zbog manje vlačne čvrstoće samih vlakana [8]. Stupovi ovijeni CTRM-om i GTRM-om imali su sličnu nosivost i deformaciju pri slomu, ali je CTRM ostao neoštećen zbog veće vlačne čvrstoće od staklenih vlakana [14]. Snopovi vlakana mogu biti obloženi smolom kako bi se poboljšala njihova prionjivost s matricom i prijenos sila među vlaknima. Gušća mreža vlakana može uzrokovati veću silu pri pojavi prve pukotine zbog bolje veze na površini tkanina – matrica. Vrsta morta matrice također ima važnu ulogu u povećanju čvrstoće i duktilnosti. Mort mora imati dobru obradivost, otpornost na skupljanje i viskoznost kako bi se mogao primijeniti na vertikalnim površinama. Sitni agregat omogućuje bolju impregnaciju morta u tkaninu. Uzorci stupova ovijenih TRM-om s mortom manje tlačne čvrstoće otkazali su odvajanjem kompozita od betona, a uzorci s mortom veće tlačne čvrstoće otkazali su lomom tkanine. Na promjenu moda otkazivanja utječe i debljina morta. Kod ploča pojačanih s tri sloja GTRM-a i jednim slojem CTRM-a, početna krutost prije pojave pukotina bila je veća kod tri sloja GTRM-a, upravo zbog debljine morta koji u prvoj fazi ima glavnu ulogu. Sila pri

raspucavanju bila je veća za GTRM. Nakon pojave pukotina, s potpunom aktivacijom vlakana, krutost CTRM-a bila je veća [7]. Polimerna vlakna se mogu dodati mortu kako bi se ostvarila bolja veza između slojeva, a time i veća duktilnost [9].

Tablica 1. Konfiguracije TRM-a na pločama, gredama i stupovima

Element koji se pojačava i konfiguracija pojačanja	
<p>Ploče na savijanje</p> 	<p>Grede na savijanje</p> 
<p>Grede na poprečnu silu</p> <p>SB </p> <p>UW </p> <p>FW </p>	<p>Pojačanja stupova</p> 

S povećanjem broja slojeva, nosivost i deformabilnost se neproporcionalno povećava, a povećanje je značajnije kod promjene broja slojeva s jednog na dva, nego pri većem broju slojeva. Broj slojeva utječe i na promjenu načina otkazivanja, zbog bolje impregnacije morta, pa tako uzorci pojačani s jednim slojem često otkazuju klizanjem tkanine u matrici, što se s povećanjem broja slojeva mijenja u odvajanje matrice od podloge. Povećanje broja slojeva također štiti od preranog sloma tkanine [9, 15]. Učinak većeg broja slojeva manje je izražen kod stupova većeg poprečnog presjeka. Oblik stupova koji se ovijaju ima utjecaj na učinkovitost pojačanja. TRM je najučinkovitiji kod kružnog presjeka zbog jednolikog tlaka, a kvadratni presjek je učinkovitiji od pravokutnog. Povećavanjem radijusa zaobljenja prizmatičnih uglova, povećava se deformabilnost [16]. Utjecaj tlačne čvrstoće betona na učinkovitost pojačanog elementa treba istražiti jer se u nekim ispitivanjima pokazala kao nebitan parametar, a u nekim je imala utjecaj. Čelična armatura, uzdužna i poprečna, ima utjecaj na pojačanja. Kao

što se i može očekivati, uzorci s većim omjerom unutarnje armature imaju manje povećanje konačne čvrstoće upravo zbog većeg doprinosa armature [17].

4 Zaključak

Dosadašnja ispitivanja pokazala su da tkaninom armirani mortovi imaju velik potencijal za pojačanja AB konstrukcija, i to ne samo za pojačanje nosivosti na savijanje, poprečnu i uzdužnu silu, nego i za povećanje duktilnosti, što je od velike važnosti u seizmički aktivnim područjima. Kako bi se materijal pravilno iskoristio, važno je osigurati dobru vezu podloge koja se pojačava i matrice, matrice i vlakana te samih vlakana. S obzirom na složenost mehanizma prijenosa opterećenja, mnogo je parametara koji utječu na kompozitno djelovanje, a time i na učinkovitost pojačanja. Važan je izbor vlakana i matrice, gustoća mreže, odnosno količina vlakana, debljina morta, broj slojeva i konfiguracija pojačanja, mogućnosti i načini sidrenja, oblik i veličina presjeka te količina uzdužne armature. Potrebno je provesti dodatna ispitivanja kako bi se proučili i kvantificirali ovi parametri, a i provjerili još neki, poput čvrstoće betona i stupnja oštećenosti. Daljnja ispitivanja su potrebna kako bi se mogli uopćiti zaključci za određeni tip kompozita.

Literatura

- [1] Elsanadedy, H.M., et al.: Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar – Experimental and numerical study, *Composite Structures*, 97 (2013), pp. 40-55, 10.1016/j.compstruct.2012.09.053
- [2] Awani, O., El-Maaddawy, T., Ismail, N.: Fabric-reinforced cementitious matrix: A promising strengthening technique for concrete structures, *Constr. Build. Mater.*, 132 (2017), pp. 94-111, 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.125
- [3] Triantafyllou, T.: Strengthening of existing masonry structures: Concepts and structural behavior, *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*, Elsevier, pp. 361-374, 2016.
- [4] ACI Committee 549.4R, *Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures (ACI 549.4R-13)*, Farmington Hills, Michigan, 2013.
- [5] Awani, O., El Refai, A., El-Maaddawy, T.: Bond characteristics of carbon fabric reinforced cementitious matrix in double shear tests, *Construction and Building Materials*, 101 (2015), pp. 39-49, 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.017
- [6] Ombres, L.: Analysis of the bond between Fabric Reinforced Cementitious Mortar (FRCM) strengthening systems and concrete, *Composites: Part B*, 69 (2015), pp. 418-426, 10.1016/j.compositesb.2014.10.027

- [7] Koutas, L.N., Bournas, D.A.: Flexural Strengthening of Two-Way RC Slabs with Textile-Reinforced Mortar: Experimental Investigation and Design Equations, *Journal of Composites for Construction*, 21 (2017) 1, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000713
- [8] D'Ambrisi, A., Focacci, F.: Flexural strengthening of RC beams with cement based composites, *Journal of Composites for Construction*, 15 (2011) 5, pp. 707–720, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000218
- [9] Triantafillou, T.C., Papanicolaou, C.G.: Shear strengthening of reinforced concrete members with textile reinforced mortar (TRM) jackets, *Materials and Structures*, 39 (2006) 1, pp. 93–103, 10.1617/s11527-005-9034-3
- [10] Al-Salloum, Y.A. et al.: Experimental and numerical study for the shear strengthening of reinforced concrete beams using textile-reinforced mortar, *Journal of Composites for Construction*, 16 (2012) 1, pp. 74–90, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000239
- [11] Triantafillou, T.C., Tzoura, E.: Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets, *Materials and Structures*, vol. 49 (2016) 1-2, pp. 17–28, 10.1617/s11527-014-0470-9
- [12] Ombres, L.: Concrete confinement with a cement based high strength composite material, *Composite Structures*, 109 (2014), pp. 294–304, 10.1016/j.compstruct.2013.10.037
- [13] Triantafillou, T.C., Papanicolaou, C.G.: Textile Reinforced Mortars (TRM) versus Fiber Reinforced Polymers (FRP) as Strengthening Materials of Concrete Structures, *Proceedings of the Seventh International Symposium of the Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-7)*, Kansas City, Missouri, 2005.
- [14] Bournas, D.A. et al.: Textile-reinforced mortar versus FRP jacketing in seismic retrofitting of RC columns with continuous or lap-spliced deformed bars, *Journal of Composites for Construction*, 13 (2009) 5, pp. 360–371, 10.1061/_ASCE_CC.1943-5614.0000028
- [15] Ombres, L.: Flexural analysis of reinforced concrete beams strengthened with a cement based high strength composite material, *Composite Structures*, 94 (2011) 1, pp. 143-155, 10.1016/j.compstruct.2011.07.008
- [16] Colajanni, P. et al.: Effects of confinement level, cross-section shape and corner radius on the cyclic behavior of CFRCM confined concrete columns, *Constr. Build. Mater.*, 55 (2014), pp. 379–389, 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.035
- [17] Ebead, U. et al.: Effectiveness of fabric reinforced cementitious matrix in strengthening reinforced concrete beams, *Journal of Composites for Construction*, 2016, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000741