

PREISKAVE STIKA MED OPEKO IN POLIMERI, ARMIRANIMI Z VLAKNI

RESEARCH OF BRICK AND FIBRE REINFORCED POLYMER JOINT

dr. Mojca Jarc Simonič, univ. dipl. inž. grad.

mojca.jarc-simonic@gi-zrmk.si

dr. Samo Gostič, univ. dipl. inž. grad.

samo.gostic@gi-zrmk.si

Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o.,

Dimičeva 12, 1000 Ljubljana

prof. dr. Roko Žarnić, univ. dipl. inž. grad.

roko.zarnic@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo

in geodezijo,

Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 691:620.1

Povzetek | Problem delaminacije utrditev iz polimerov, armiranih z vlakni, z opečnih zidov, je eden glavnih vzrokov za predčasen padec strižne nosilnosti utrjenih zidov, obremenjenih s potresno obremenitvijo. V članku so predstavljene strižne preiskave stikov opeke in armiranih polimerov, s katerimi smo želeli razviti stik z večjo nosilnostjo. Opravljali smo preiskave z vnosom strižne obremenitve na stik vzporedno s stično ploskvijo. Preiskave preizkušancev opeke s FRP-utrditvami so bile v grobem razdeljene na dva dela: obloge s karbonskimi vlakni v epoksidnem lepilu (CFRP) ter obloge s steklenimi mrežicami v cementni malti (GFRM). V prvi vrsti smo ugotovili, da je najpomembnejše pred lepljenjem zagotoviti primerno podlago, predvsem podlaga ne sme biti pregladka. Dosežene razlike v nosilnosti in porabi energije do odtrganja so zelo velike, pomembno pa k povečanju nosilnosti in porabi energije prispevajo tudi izboljšani načini sidranja koncev trakov. Bodisi zaokrožitev konca trakov bodisi lastovičji rep uspešno prepreči možnost porušitve z odlepitvijo, aktivira pa tudi večji volumen opeke, ki jo morajo iztrgati iz opečne mase, za kar pa potrebujejo veliko več energije. Seveda visoko nosilnost zagotovi tudi velika polepljenost s CFRP-trakovi, vendar pa nosilnost ni sorazmerna površini nalepitve. Ključne besede: utrjevanje opečnih zidakov, obloga, trakovi iz karbonskih vlaken, epoksidno lepilo, mreža iz steklenih vlaken, opeka, strižne preiskave stika FRP-opeka, nosilnost stika FRP-opeka

Summary | Problem of the delamination of fibre-reinforced polymers (FRP) from brick masonry walls is one of the main reasons for preliminary drop of shear strength of strengthened walls, loaded with earthquake forces. The article presents the research on brick-FRP shear joint. The intention of research was to find configurations with higher capacity of joint (in terms of load bearing and/or deformation). Loading of FRP stripes was performed in the parallel direction of the FRP-masonry surface (direct shear). Tests of FRP-brick samples were in general divided into two parts: strengthening of bricks with carbon FRP-s in epoxy glue (CFRP) and with glass meshes in cement mortar (GFRM). The most important factor of high load bearing capacity was adequately prepared surface before placing the strengthening layer (CFRP or GFRM) that should not be too smooth. The differences achieved in strength and energy absorption are big. An important contribution to increased load capacity and energy absorption is also anchored endings of the strips. The rounding of the strips ends or the shape of swallowtail both successfully prevent the possibility of collapse with peeling of the stripe. They also activate a greater volume of

brick, which they must rip from the brick, thus requiring more energy for the delamination. Higher strength was achieved also with higher amount of FRP reinforcement, though the strength is not proportional to the amount of glued FRP-s.

Key words: strengthening of bricks, coating, carbon fibre strips, epoxy glue, glass fibre grid, shear tests of joint FRP-brick, strength of joint FRP-brick

1 • UVOD

Opazovanje obnašanja zidanih stavb med potresi kaže, da je velikokrat trdnost zidovja premajhna, da bi bili zidovi sposobni prevzeti med potresom nastale sile. Med številnimi poznanimi metodami utrditve, ki so bile izvedene v praksi, se je pri opečnem zidovju najbolj uveljavilo oblaganje z armiranimi ometi na eni ali obeh straneh zidu ali pa zamenjava obstoječe slabe malte med spojnicami s trdnejšo, t. i. prefugiranje. Tem metodam so se pridružile obloge iz drugih materialov, kot so tkanine ali mreže iz polimerov, utrjenih s steklenimi (GFRP) ali karbonskimi vlakni

(CFRP). Mreže se polagajo v malto ali epoksidnem lepilu, tkanine pa se na izravnano površino zidu lepijo z epoksidnimi lepili.

Učinek utrjevanja opečnih zidov je preiskovalo kar nekaj avtorjev ((Schwegler, 1994), (Triantafillou, 1998), (Gostič, 2004), (Gostič, 2006), (ElGawady, 2006), (Alcaino, 2007), (Tomažević, 2011), (Triller, 2017)), vendar je število raziskav razmeroma majhno. Kljub temu je vsem skupno to, da je stik med opeko in utrjevalnimi oblogami največkrat merodajen način porušitve utrjenih zidov, zaradi česar je najpomembnejše zagotoviti

čim bolj nosilen stik, saj bo le tako utrjen zid kot celota bolj nosilen in duktilen ter potresna varnost objekta večja. Raziskovalci poročajo predvsem, da se trakovi, kadar so nalepljeni površinsko, najhitreje odtrgajo na konceh. Tam se namreč tvorijo največje koncentrirane napetosti pravokotno na podlago. Precej bolje so se izkazali trakovi, ki so prilepljeni po celotnem obodu zidu, vendar v veliko primerih ta način utrjevanja ni možen. Preiskav s področja nosilnosti stika opeke in FRP-utrditev je malo ((Khalifa, 1999), (Hall, 2002), (Oliveira, 2011)), zato smo pristopili k lastnim preiskavam z namenom, da raziščemo obnašanje stika in preizkusimo nove načine pritrditve koncev trakov.

2 • PROGRAM RAZISKAV, PRIPRAVA PREIZKUŠANCEV IN MATERIALI

2.1 Zasnova preiskav

Pri zasnovi programa raziskav smo upoštevali spoznanja, ki smo jih dobili med preiskavo opečnih zidov, utrjenih s površinsko nalepljenimi CFRP-trakovi ((Jarc Simonič, 2014), (Jarc Simonič, 2015)), ki so se izkazali za slabo učinkovite, ker je stik opeke in FRP-utrditev zelo hitro odpovedal. Tako smo raziskali učinek utrjevanja s CFRP-trakovi z različnim sidranjem ter GFRM-oblogo z mrežicami v ojačeni cementni malto na dveh različnih podlagah. Za CFRP-preizkušance smo izbrali široke (10 cm) in ozke trakove (1,5 cm) z dvema različnima dolžinama, 10 in 20 cm, za podlago pa smo priskrbeli staro in novo opeko. Sproti smo ugotavljali učinkovitost/neučinkovitost CFRP-utrditev, razvijali različne vrste sidranja in tako obravnavali 17 skupin preizkušancev, praviloma s po 5 preizkušanci. Ozke trakove smo nalepili ravno, z zaobljenim koncem, s čepi, spreminjali smo podlago, ki je bila gladka (obstoječa stara ali nova opeka), narebrena ali pod vplivom 100 % vlage (30 dni v vodi). Ko smo ugotovili, da so porušitve – odtrganje trakov od podlage, hipne tudi zaradi velike togosti nalepljenega sistema, smo preizkusili še vpliv dodajanja tekoče gume v epoksidno lepilo, da bi togost nalepljenega materiala zmanjšali.

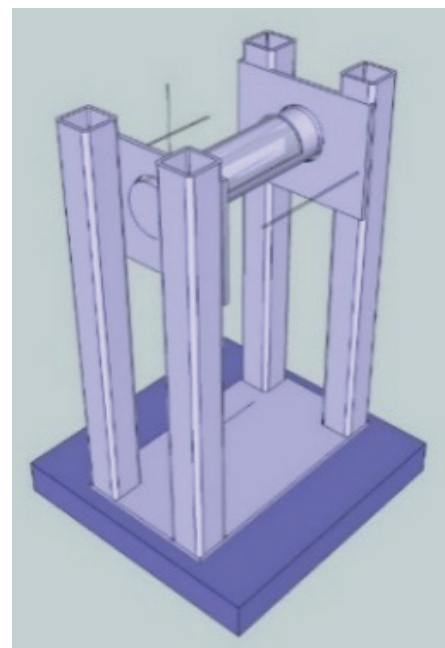
2.2 Priprava preizkušancev

Pripravo preizkušancev in preiskave stikov smo udeležili v laboratoriju Gradbenega inštituta ZRMK. Uporabili smo staro opeko, ki smo jo pridobili iz objekta Cirkovce, kjer smo delali tudi in-situ preiskave utrjenih zidov ((Jarc

Simonič, 2014), (Jarc Simonič, 2015)), in je bil predviden za rušenje. Novo polno opeko navadnega formata smo dobavili iz Hrvaške. Preiskave smo zasnovali za izvedbo na tlačni stiskalnici. Da bi lahko vnesli natezno silo v trakove, smo zasnovali dvojčke opek, na katerih je bil po notranji strani polkrožno nalepljen CFRP/GFRM trak (slika 1). Vzorec je bil obešen na kovinsko cev s primernim radijem



Slika 1 • Opeki s FRP-trakom.



Slika 2 • Jekleni okvir.



Slika 3 • Vzorec v stiskalnici.

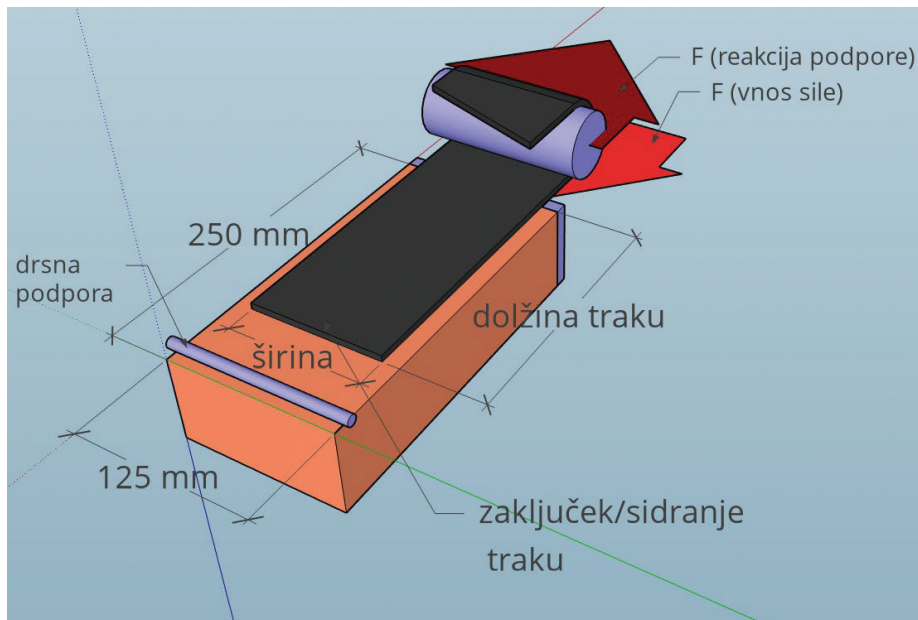
zaokrožitve (40 mm). Konce opek je tlačna stiskalnica potiskala navzdol, medtem ko je kovinsko cev podpiral jekleni okvir (slika 2). Dimenzije okvirja so znašale 20 x 20 x 30 cm in so bile prilagojene dimenzijam plošč tlačne stiskalnice (slika 3).

Na preizkušancih smo najprej pripravili podlago, tako da smo opeke očistili, nekatere narebrili s kotno brusilko obojestransko poševno, nekaterim izvrtali vdolbine za čepe premera 12 mm, globine 5 mm, nekatere pa zaključili z zaokrožitvijo približno v radiju 3,5 cm. Pripravi podlage preizkušancev s CFRP-utrditvijo so sledili impregnacija, izris položaja trakov, nanos epoksidnega lepila, rezanje trakov, nalepitev trakov, prepojitvev trakov z epoksidnim lepilom, drugi premaz epoksidnega lepila, utrditev srednjega zaokroženega dela, končni premaz z epoksidnim lepilom, vpetje v kalup, premaz zaokrožitve in strjevanje.

Pripravi podlage preizkušancev z GFRM-oblogo so sledili močenje opek v vodi, rezanje mrežice, priprava cementne malte v mešalniki, nanos prvega sloja cementne malte, poravnava robov malte, vtiskovanje mrežice v malto, drugi nanos cementne malte, vpenjanje v kalup, nanos malte na zaokroženi del in strjevanje v kalupu.

2.3 Karakteristike uporabljenih materialov

Za utrjevanje smo uporabili material, ki ga je mogoče dobiti na trgu. Posebej smo raziskovali tudi mehanske lastnosti teh materialov. Za oblogo s širokimi trakovi smo uporabili tkanino S&P C-Sheet 240 in dvokomponentno epoksidno lepilo S&P Resin Epoxy 55. Tkanina



Slika 4 • Shema (pol) vzorca z označenimi merami in silami.

iz karbonskih vlaken je bila enosmerno pletena tkanina debeline 0,176 mm. Mehanske lastnosti, dobljene iz preiskav, in deklarirane vrednosti so podane v preglednici 1 in preglednici 2.

	silna	natezna trdnost	deformacije	modul elastičnosti
	F (kN)	σ (MPa)	ϵ (%)	E (GPa)
povprečje	9,07	3435,0	2,5	206,5
st. dev.	1,5	573,0	0,37	15,1
c.o.v.	16,5 %	16,7 %	14,8 %	7,3 %
Primerjava deklariranih in izmerjenih vrednosti za S&P-trakove				
deklarirano		3800	1,55	240
delež pov/dek		90 %	161 %	86 %

Preglednica 1 • Rezultati preiskav natezne trdnosti FRP trakov S&P (n=6).

	Natezna trdnost	Gostota	Raztezek do pretrga	Čas strjevanja
	(MPa)	(kg/l)	(%)	(dni)
Resin Epoxy 55	35,8 (po 14 dneh)	1,11	2,3 (po 14 dneh)	7

Preglednica 2 • Karakteristike epoksidnega lepila S&P.

Preiskava natezne trdnosti FRP-trakov C-iar				
	silna	natezna trdnost	deformacije	modul elastičnosti
	F (kN)	σ (MPa)	ϵ (%)	E (GPa)
povprečje	22,24	3369,6	1,23	242,9
st. dev.	1,3	194,2	0,33	87
c.o.v.	5,8 %	5,8 %	26,8 %	35,8 %
Primerjava deklariranih in izmerjenih vrednosti za C-iar				
deklarirano		3500	1,6	235
delež pov/d		96 %	77 %	103 %

Preglednica 3 • Rezultati preiskav natezne trdnosti FRP-trakov C-iar (n=6).

Koeficienti variacije kažejo, da raztrosi niso veliki oz. so preiskane lastnosti dokaj homogene.

Za oblogo z ozkimi trakovi smo uporabili FRP-trakove Carboniar 800/1,5 ter epoksidno lepilo Epoxiar C64/ET. Preizkusili smo tudi preizkušance lepila, strjenega z dodatkom tekoče gume. Trakovi iz ogljikovih vlaken so bili enosmerno pleteni tovarniško izdelani trakovi v širini 1,5 cm nominalne debeline 0,44 mm.

Koeficienti variacije kažejo, da raztrosi sil in natezних trdnosti niso veliki, večje odstopanje je pri deformacijah in modulu elastičnosti.

V preiskavah strjenega epoksidnega lepila Epoxiar so raztrosi majhni, nekoliko večji pri deformacijah.

Ugotovljeni koeficienti variacije pri preiskavi natezne trdnosti epoksidne smole z dodatkom gume niso veliki in kažejo na dokaj homogene preiskane lastnosti.

Za oblogo z mrežicami v malti smo uporabili mrežico z oznako SikaWrap-350G in mikroarmirano cementno malto Sika Mono-Top-722 Mur. Mrežica z okenci nominalno 15.7/10.1 mm je mrežica iz steklenih vlaken z alkalno odporno oblogo. Mrežice nismo preizkušali. Trdnost posamezne niti je po podatkih proizvajalca 3,4 GPa, obremenitve, ki jih prenese mrežica, pa so 77 kN/m v vzdolžni in 76 kN/m v prečni smeri. Raztezek ob porušitvi je 3%. Tlačno in upogibno trdnost malte smo preizkušali po standardu EN 1015-11.

Preiskava natezne trdnosti epoksidne smole Epoxiar				
	sila	natezna trdnost	deformacije	modul elastičnosti
	F (kN)	σ (MPa)	ε (%)	E (GPa)
povprečje	1,1	28,4	1,54	2,8
st. dev.	0,15	3,7	0,44	0,36
c.o.v.	13,6 %	13,0 %	28,6 %	12,9 %

Preglednica 4 • Rezultati preiskav natezne trdnosti strjenega epoksidnega lepila Epoxiar (n=6).

Preiskava natezne trdnosti epoksidne smole Epoxiar s tekočo gumo				
	sila	natezna trdnost	deformacije	modul elastičnosti
	F (kN)	σ (MPa)	ε (%)	E (GPa)
povprečje	0,65	16,3	1,8	1,43
st. dev.	0,06	1,4	0,3	0,1
c.o.v.	9,2 %	8,6 %	16,7 %	7,0 %
Doseženi odstotek Epoxiar z gumo in Epoxiar brez				
delež z/brez	60 %	57 %	117 %	51 %

Preglednica 5 • Natezne trdnosti epoksidne smole Epoxiar s tekočo gumo (n=6).

	upogibni preizkus utrditvene malte		tlačni preizkus utrditvene malte	
	maks. sila	up.trdnost	maks. sila	tl.trdnost
	$P_{o,j,sr}$ (kN)	$f_{o,j,f}$ (MPa)	$P_{o,j,sr}$ (kN)	$f_{o,j,c}$ (MPa)
povprečje	2,8	6,7	50,9	32,0
st. dev.	0,26	0,6	6,4	4,0
c.o.v.	9 %	9 %	13 %	13 %

Preglednica 6 • Rezultati preiskav tlačne in upogibne trdnosti prizem ojačilne malte (n=4).

3 • REZULTATI PREISKAV

3.1 Načini porušitve

Tipični načini porušitve so bili odvisni od zasnove preizkušancev, predvsem od vrste

utrditvenega materiala, dimenzij lepljene površine pa tudi od vrste in priprave površine podlage. V naslednji preglednici so prikazani

načini porušitve preskušanih vrst stikov med opeko in različnimi utrditvenimi sredstvi.

Skupina	Način utrditve	Izgled porušitve	Opis načina porušitve
1 CFRP (S) 10/20	Široki dolgi trakovi		Široki trakovi dolžine 20 cm na stari opeki so se odrgali od opeke tik pod površino, na koncu traku pa se je zaradi koncentracije napetosti odrgal večji kos opeke približno 10 mm v globino opeke.
2 CFRP (S) 10/10	Široki kratki trakovi		Široki, 10 cm dolgi trakovi na stari opeki so se večinoma porušili po opeki bodisi podobno kot pri skupini 1 ali pa se je odrgal večji klin opečne mase od celotne opeke.

<p>3 CFRP (S) 1,5/20</p>	<p>Ozki dolgi trakovi na stari opeki</p>		<p>Ozki dolgi trakovi, ki so bili nalepljeni na staro opeko, so se odtrgali od podlage po opeki, nekateri enakomerno do konca, v več primerih pa se je na koncu odtrgal še kos opeke v globino 6-10 mm.</p>
<p>4 CFRP (N) 10/20</p>	<p>Široki dolgi trakovi na novi opeki</p>		<p>Široki dolgi karbonski trakovi na novi opeki so se odtrgali skoraj na površini opeke, v treh primerih pa se je na koncu traku odtrgal večji kos opeke do globine 14-17 mm.</p>
<p>5 CFRP (N) 10/10</p>	<p>Široki kratki trakovi na novi opeki</p>		<p>Široki kratki trakovi na novi opeki so se porušili podobno kot na stari opeki. Večinoma je nastopil poševen odlom opeke od konca traku.</p>
<p>6 CFRP (S) 1,5/10</p>	<p>Ozki kratki trakovi na stari opeki</p>		<p>Ozki kratki trakovi na stari opeki so se v treh primerih v začetku nalepive porušili globlje v opeko (13-23 mm), v nadaljevanju po opeki tik pod površino, na koncu pa 4-20 mm v globino. Dva preizkušanca sta se na začetku porušila tik pod površino opeke.</p>
<p>7 CFRP (N) 1,5/10</p>	<p>Ozki kratki trakovi na novi opeki</p>		<p>Ozki kratki trakovi na novi opeki so se odtrgali od podlage brez značilnega večjega opečnega kosa na koncu traku. Dosežene sile so bile nizke. Ugotovili smo, da je bila podlaga na novih opekah pregladka.</p>
<p>8 CFRP (N) 1,5/20</p>	<p>Ozki dolgi trakovi na novi opeki</p>		<p>Na preizkušancih z dolgimi ozki trakovi je bil način porušitve enak kot pri skupini 7. Vrednosti doseženih sil so bile nizke zaradi pregladke površine opeke.</p>
<p>9 GFRM (S) 10/20</p>	<p>Obloga iz mrežice v malti na stari opeki</p>		<p>Pri preizkušancih, utrjenih z mrežico v malti, se je pokazalo, da je izvedba utrditve problematična. Poskus je uspel le v dveh primerih, ko se je obloga odlepila od podlage. V neuspešnih primerih je prišlo do trganja mrežice na slabo utrjenem zaobljenem delu.</p>

10 CFRP (N) 1,5/10 z	Ozki zaobljeni trakovi na novi opeki		Preizkušanci, pri katerih smo konec opeke zaoblili in 10 cm dolg trak delno prilepili na zaobljeno, delno pa na ravno podlago, so izkazali visoko nosilnosti stika. Preizkušancem se je od podlage na koncu odtrgal velik kos opeke večje širine in v globino od 9 do 22 mm.
11 GFRM (N-n) 10/20	Obloge iz mrežice v malti na novi narebreni opeki		Obloga iz steklene mrežice v cementni malti je bila nalepljena na izboljšani podlagi – na novi opeki z narebreno površino. Nosilnost stika se je zvišala vsaj za dvakratno vrednost. V večini primerov se ni porušil stik, ampak se je pri poružitvi iz malte izpulila mrežica.
12 CFRP (N-n) 1,5/10	Ozki kratki trakovi na novi narebreni opeki		Ravno nalepljeni ozki kratki trakovi na novi opeki z narebreno površino so se večinoma porušili po opeki tik pod površino in na koncu trakov v globino 19-26 mm.
13 CFRP (N) 1,5/10 č	Ozki kratki trakovi na novi gladki opeki z dodanim čepom iz epoksidnega lepila		Pri preizkušancih z dodanim čepom na gladki novi opeki je prišlo do povečanega sipanja energije. Zaradi čepov na koncu trakov se je v vseh primerih odtrgal večji kos opeke v globino 18-23 mm, s čimer je bila dosežena višja nosilnost stika.
14 CFRP (N-n) 1,5/10 lastovičji	Ozki kratki trakovi v obliki lastovičjega repa na novi narebreni opeki		Zaželen način poružitve smo dosegli pri ozkih kratkih trakovih, ki smo jih polagali na novo narebreno opeko, zaključili pa tako, da smo konec traku razcepili na dva dela. To smo poimenovali lastovičji rep. Preizkušanci so se porušili tako, da se je odtrgal velik kos opeke v globino 20 do 32 mm bodisi po celi dolžini bodisi na koncu opeke, kar je privedlo do visoke nosilnosti stika.
15 CFRP (S) 1,5/10 z	Ozki kratki trakovi na zaobljeni stari opeki		Zaobljeni trakovi na stari opeki so se obnašali podobno kot zaobljeni trakovi na novi opeki. Od podlage se je odtrgal velik kos opeke na zaobljenem delu v globino 11-18 mm v precejšnji širini.

<p>16 CFRP (S) 1,5/10 v</p>	<p>Ozki kratki trakovi na stari, z vodo zasičeni opeki</p>		<p>Kratki ozki trakovi na stari opeki, zasičeni z vodo, so hitro odpovedali. Porušitev je večinoma potekala po opeki tik pod lepilom in z doseženimi nizkimi nosilnostmi.</p>
<p>17 CFRP (N-n) 1,5/10 g</p>	<p>Ozki kratki trakovi v epoksidnem lepilu z dodatkom gume na novi narebreni opeki</p>		<p>Z dodatkom tekoče gume v epoksidno lepilo smo dosegli bolj enakomerno razporeditev sil vzdolž trakov, kar se je izražalo v enakomerni porušitvi po celotni dolžini trakov do globine 20-30 mm.</p>

Preglednica 7 • Pregled načinov porušitve lepjenih stikov med opeko in utrditvenimi plastmi.

3.2 Nosilnost stikov

V preglednici podajamo dosežene povprečne nosilnosti preskušanih stikov, pri čemer so preizkušanci sortirani in združeni glede na uporabljene materiale (CFRP-trakovi ali GFRM; stara, nova ali nova narebrena opeka), dimenzije traku (š – širina traku; d – dolžina traku) in način sidranja (zaključka traku).

opeka	CFRP									
	š=10 cm			š=1,5 cm						
	d=20cm	d=10cm	d=20cm	d=10cm						
				čepi	zaobljen konec	lastovičji rep	dodatek gume	v vodi 30 dni		
stara	1-CFRP(S)10/20 25,91	2-CFRP(S)10/10 32,15	3-CFRP(S)1,5/20 12,4	6-CFRP(S)1,5/10 19,25		15-CFRP(S)1,5/10 z 21,73				16-CFRP(S)1,5/10 v 13,69
nova	4-CFRP(N)10/20 26,48	5-CFRP(N)10/10 23,96	8-CFRP(N)1,5/20 10,57	7-CFRP(N)1,5/10 7,99	13-CFRP(N)1,5/10 č 9,14	10-CFRP(N)1,5/10 z 16,22				
nova-narebrena				12-CFRP(N-n)1,5/10 17,03			14-CFRP(N-n)1,5/10 l 19,99	17-CFRP(N-n)1,5/10 g 16,06		

F[kN]

opeka	GFRM
nova narebrena	11-GFRM(N-n)10/20 12,43
stara	9-GFRM(S)10/20 9,37

Preglednica 8 • Povprečne porušne sile (glede na širino in dolžino traku, vrsto opeke in vrsto traku/utrditve).

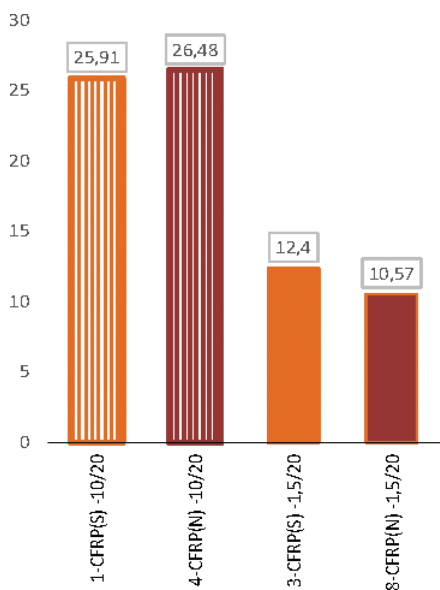
4 • ANALIZA REZULTATOV

4.1 Primerjava nosilnosti

Primerjava rezultatov preiskav preizkušancev z 10 cm širokimi trakovi na stari in novi opeki z dolžinama trakov 10 in 20 cm je pokazala, da dolžina trakov ne vpliva sorazmerno na zvišanje nosilnosti stika. Zaradi raztrosa rezultatov med preizkušanci so celo kratki (10 cm) trakovi na stari opeki s povprečno porušno silo 32,15 kN prenesli več kot 20-cm trakovi, kjer je bila povprečna porušna sila 25,91 kN. Rezultat ni povsem logičen, kajti površina nalepljenega traku je bila 2-krat večja. Vzrok je v kvaliteti opeke in izvedbi preiskave. Vsa stara opeka je bila iz zelo neenotnega materiala, kar

se je dalo prepoznati že po razliki v barvi opek. Opeke slabše trdnosti so bile izrazito oranžne barve, opeke boljše trdnosti pa izrazito rdeče barve. En vzorec med krajšimi utrditvami je močno izstopal od preostalih po nosilnosti stika. Bil je narejen iz opeke temno rdeče barve, dosežena nosilnost pa je bila 50,36 kN. Ob izločitvi tega preizkušanca iz njegove skupine znaša v skupini povprečna nosilnost 27,59 kN, kar je upoštevano v primerjavah. Ob izvedbi preiskav smo ugotovili, da manjša ekscentričnost vnosa sile (vertikalno silo smo v vzorce vnašali cca 2,5 cm od roba opeke oz. od stika opeke in FRP-traku), ki je potreb-

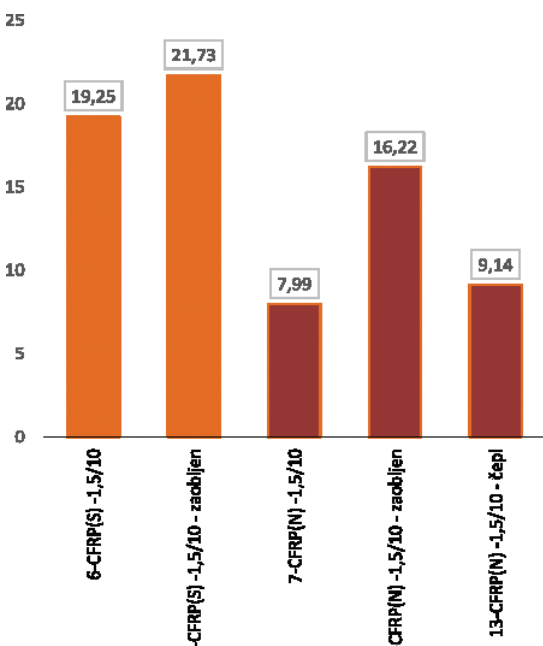
na, da preiskavo na ta način lahko izvedemo, negativno vpliva na vzorce s kratko utrditvijo s širokimi trakovi. Ta ekscentričnost skoraj ni imela vpliva pri opekah z dolgo utrditvijo in utrditvijo z ozkimi trakovi. Preizkusi širokih trakov na novih opekah so pokazali, da je povprečna dosežena nosilnost stikov 20-cm trakov 26,48 kN, 10-cm trakov pa 23,96 kN. Stiki 1,5 cm širokih CFRP-trakov enakih dolžin, kjer je bila površina lepjenja 6,6-krat manjša kot pri širokih utrditvah, so se porušili strižno, zato lahko direktno primerjamo 20-cm utrditve na novi in stari opeki, kajti porušni mehanizmi so bili povsod enaki. Na diagramu spodaj (slika 5) lahko vidimo, da je dosežena maksimalna sila pri utrditvah z ozkimi trakovi za približno polovico nižja od nosilnosti stikov pri



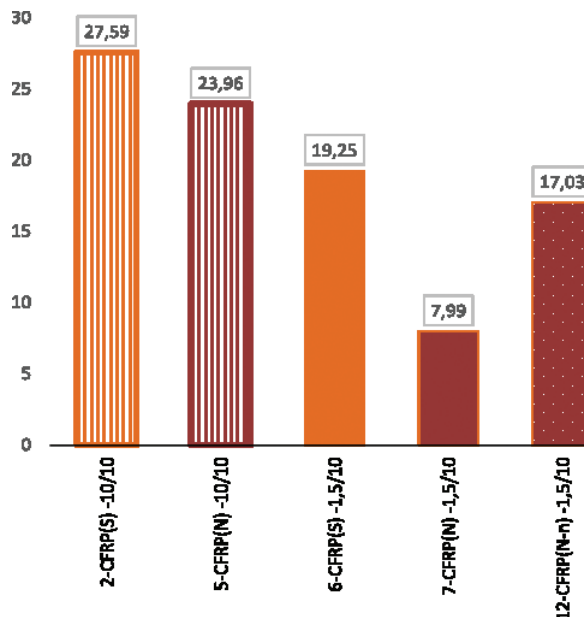
Slika 5 • Strižna nosilnost 20-cm FRP-utrditev na novi (N) in stari (S) opeki.

širokih trakovih na stari opeki in nekoliko višja pri širokih trakovih na novi opeki.

Če primerjamo stike 10-cm trakov (slika 6), je razlika pri lepljenju na stare opeke nižja. Pri novih opekah je bila maksimalna dosežena nosilnost približno 1/3 maksimalne nosilnosti stikov 10 cm širokih trakov. Pri utrditvah z



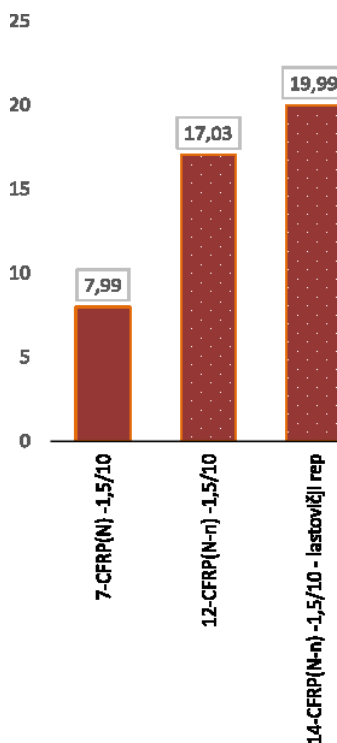
Slika 7 • Strižna nos. FRP-utrditev na novi (N) in stari (S) opeki z zaokroženim koncem trakov ali čepi.



Slika 6 • Strižna nosilnost 10-cm FRP-utrditev na stari (S), novi (N) in novi narebreni (N-n) opeki.

20 cm dolgimi ozkimi trakovi kakor tudi pri 10 cm dolgih trakovih je bila dosežena višja nosilnost stika na stari opeki. Glavni razlog ni v nosilnosti opeke, temveč v hrapavosti njene površine. Stara opeka je bila izdelana ročno z veliko neravninami, nova pa je gladka. Za nadaljnje preiskave je bilo evidentno, da je

treba izboljšati prijemljivost površine s povečanjem njene hrapavosti ali pa z načinom same utrditve. Večjo hrapavost površine novih opek smo dosegli z navzkrižno potekajočimi utori globine približno 1 mm. Na sliki (slika 8, desno) lahko v zadnjih dveh stolpcih primerjamo izboljšanje nosilnosti v primeru narebrenih opek. Z neposredno primerjavo preizkušancev z enako utrditvijo na gladki in narebreni površini lahko opazimo 213% izboljšanje nosilnosti (7,99 kN pri gladki opeki in 17,03 kN pri narebreni površini). Ta rezultat je tudi primerljiv z rezultatom stare opeke. Bistvena ugotovitev prvega sklopa preiskav je torej zagotoviti zadostno hrapavost površine. Nekoliko nelogičen je rezultat pri stari opeki s povprečno vrednostjo nosilnosti 19,25 kN za 10-cm trak in 12,4 kN za 20-cm trak. Iz podrobnega pregleda porušitev lahko vidimo, da so se preizkušanci pri kratkih trakovih v treh primerih porušili po opeki tako, da se je odtrgal precej širši del opeke, kot je znašala širina trakov, torej je površina porušitve pri takem klinu precej večja in zato so ti preizkušanci tudi dosegli večjo nosilnost. Kvaliteta opeke je bila pri krajših trakovih višja, saj so bili nekateri preizkušanci iz trdnejše rdeče opeke. Bolj logične vrednosti doseženih nosilnosti so pri novi opeki, kjer je pri krajših trakovih s povprečno porušno silo 7,99 kN za približno 32 % manjša od nosilnosti, dosežene pri 20-cm trakovih, kjer je ta v povprečju znašala 10,57 kN. Tudi v tem primeru lahko sklepamo, da dolžina nalepljenih trakov ne prispeva sorazmerno k višji nosilnosti.



Slika 8 • Strižna nos. CFRP na gladki (N) in narebreni (N-n) opeki ravno ter z lastovičjim repom.

Sidranje trakov na zaobljenih površinah se je izkazalo za učinkovit način sidranja koncev trakov. Pri takem sidranju je bila dosežena približno za 100 % višja nosilnost (16,22 kN) v primerjavi z ravno nalepljenimi trakovi (7,99 kN). Z zaobljenim sidranjem je bil dosežen ustreznejši mehanizem porušitve z odtrganjem kosa opeke na koncu traku. Pri utrditvi na stari opeki je dosežen podoben učinek zaobljenega sidranja. Nosilnost zaobljenega sidranja je bila višja za 12 % (21,73 kN) v primerjavi s sidranjem brez zaobljenosti (19,25 kN). Pri enakem načinu porušitve je bil učinek utrditve na stari opeki večji kot pri novi opeki kljub enakem mehanizmu porušitve. Zaobljeni konci trakov so torej zelo učinkovit način sidranja FRP-trakov (slika 7).

Pri gladki opeki smo preizkusili še en način »sidranja« koncev trakov. Približno 1,5 cm od konca trakov smo izvrtali 5 mm globoke luknje, ki smo jih zapolnili z epoksidnim lepilom istočasno z lepljenjem trakov na površino opeke. S tem smo dosegli boljši mehanizem porušitve, pri katerem se je ob čepu iztrgal večji kos opeke in posledično dosegla višja nosilnost stika. Čep je povzročil zvišanje nosilnosti stika za 14 % (9,14 kN) v primerjavi z nosilnostjo stikov ravno nalepljenih trakov (7,99 kN; slika 7).

V nadaljevanju raziskav smo razvijali način sidranja, pri katerem bi na sidrišču aktivirali kar se da veliko površino opeke in s tem

dosegli višjo nosilnost. Zato smo konce trakov razcepili na dva dela v obliki lastovičjega repa in jih nalepili na opeke z narebreno površino. Povprečna nosilnost sidranja z »lastovičjim repom« (19,99 kN) se je zvišala za 17 % v primerjavi z ravnim lepljenjem na enako narebreno površino (17,03 kN) oz. za kar 150 % v primerjavi z ravnim lepljenjem na gladko površino (7,99 kN). Zato lahko tudi za tak način sidranja rečemo, da je učinkovit (slika 8).

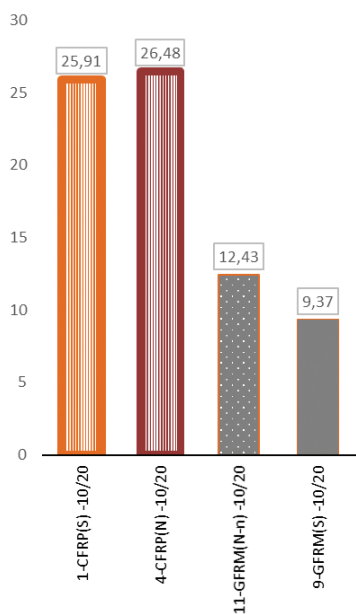
Učinkovitost utrditve z armiranimi oblogami (steklene mrežice v cementni malti) smo primerjali z učinkovitostjo utrditve s CFRP-trakovi, nalepljenimi z epoksidnim lepilom. Izdelali smo preizkušance z 10 cm širokimi in 20 cm dolgimi trakovi na stari in novi opeki z narebreno površino. Nosilnost utrditve na stari opeki je znašala 9,37 kN, kar predstavlja 36 % nosilnosti CFRP-utrditve na epoksidnem lepilu na stari opeki (25,91 kN). Nosilnost utrditve na novi narebreni opeki je znašala 12,43 kN, kar predstavlja 47 % nosilnosti utrditve CFRP z epoksidnim lepilom, ob tem da preizkušanci z epoksidnim lepilom niso imeli narebrenih površin (26,48 kN). V tem primeru je pričakovati, da bi bila razlika še večja (slika 9).

Preizkušanci, ki so bili 30 dni potopljeni v vodi, so pričakovano izgubili nosilnost. Njihova nosilnost je znašala 13,69 kN, kar je 71 % nosilnosti enakih preizkušancev (19,25 kN), ki niso bili izpostavljeni vlagi (slika 10).

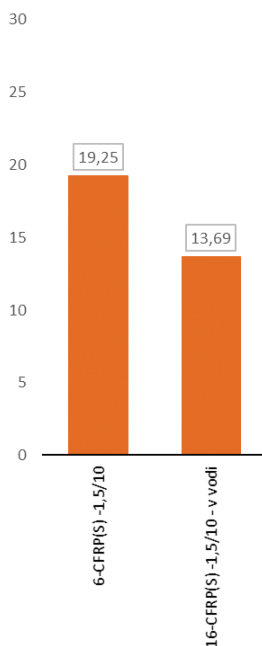
Porušitve preizkušancev so bile v vseh primerih hipne, bodisi z odleptitvijo od površine, za kar smo ugotovili, da je razlog v pregladki površini, bodisi z bolj zaželenim odtrganjem kosa opeke od celotne mase. Največkrat je do odtrganja kosa opeke prišlo na koncih trakov, kjer je bila koncentracija normalnih napetosti največja. Iz tega smo lahko sklepali, da je epoksidno lepilo preveč tog material, ki ne dopušča enakomerne razporeditve napetosti po celotni dolžini nalepljenega traku. Veliko togost so izkazale tudi utrditve s stekleno mrežico v cementni malti.

Razmere bi se lahko bistveno spremenile, če bi se našla taka mešanica epoksidnega lepila, ki bi povečala njegovo podajnost, kar so poskusili tudi (Ozturk, 2001). S tem bi se zagotovila boljše prerazporeditve napetosti po celotni dolžini lepljenca. V iskanju možnosti modifikiranja epoksidnega lepila smo mu dodali tekočo gumo (sintetična termoplastična guma). Rešitev se je izkazala za dokaj obetavno. Porušitev utrditve je nastopila po celotni dolžini stika po opeki do globine 2–3 cm. Nosilnost stika z dodatkom 15 % tekoče gume je bila sorazmerno visoka (16,06 kN; slika 11).

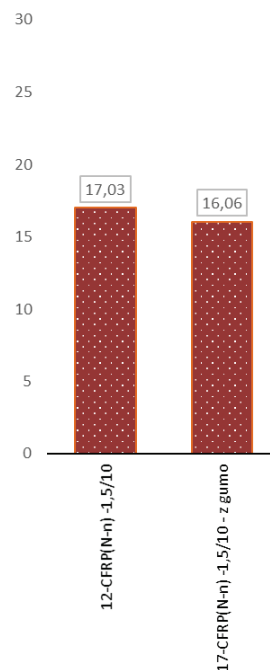
O potencialno večji duktilnosti stika lahko na podlagi analize rezultatov govorimo le v primeru uporabe utrditve z mrežico v malti, vse ostale porušitve so bile hipne, brez vnaprejšnjega opozorila, le da so preizkušanci na iniciacijo trganja opozorili s pokanjem.



Slika 9 • Strižna nos. GFRM-utrditev na novi narebreni (N-n) in stari (S) opeki v primerjavi s CFRP-utrditvijo enake površine.



Slika 10 • Strižna nosilnost CFRP-utrditev na suhi in z vodo nasičeni stari (S) opeki.



Slika 11 • Strižna nosilnost CFRP-utrditev na narebreni (N-n) opeki brez dodatka gume ali z dodatkom gume.

opeka	CFRP					
	š=10 cm		š=1,5cm			
	d=20cm	d=10cm	d=20cm	d=10cm		
			čepi	zaobljen konec	lastovičji rep	dotadek gume v vodi 30 dni
stara	1-CFRP(S)10/20 1,30	2-CFRP(S)10/10 2,76	3-CFRP(S)1,5/20 4,13	6-CFRP(S)1,5/10 12,83	15-CFRP(S)1,5/10 z 14,49	16-CFRP(S)1,5/10 v 9,13
nova	4-CFRP(N)10/20 1,32	5-CFRP(N)10/10 2,40	8-CFRP(N)1,5/20 3,52	7-CFRP(N)1,5/10 5,33	13-CFRP(N)1,5/10 č 6,09	10-CFRP(N)1,5/10 z 10,81
nova-narebrena			12-CFRP(N-n)1,5/10 11,35		14-CFRP(N-n)1,5/10 l 13,38	17-CFRP(N-n)1,5/10 g 10,71

F/Analepive [N/mm²]

opeka	GFRM
nova narebrena	11-GFRM(N-n)10/20 0,62
stara	9-GFRM(S)10/20 0,47

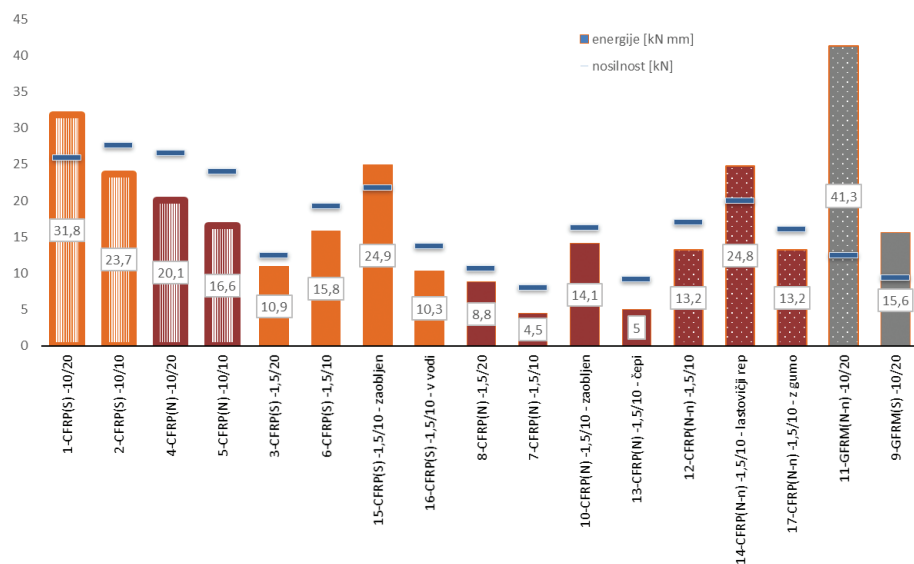
Preglednica 9 • Strižna nosilnost opečnih dvojčkov s FRP-/FRM-utrditvami na enoto površine lepljenja.

Nosilnost ni bila sorazmerna širini (oziroma površini) nalepljenih trakov, temveč predvsem od načina sidranja, kar prikazuje preglednica 9.

Dosežena sila na enoto površine lepljenja poveča razliko v nosilnosti med širokimi trakovi, s tem da kratki 10-cm trakovi dosegajo približno 2-krat večjo nosilnost v primerjavi z 20 cm dolgimi trakovi. Pri vseh širokih trakovih smo dosegli bistveno manjšo silo na enoto površine kot pri ozkih trakovih (od 0,47 N/mm² pri preizkušancih z mrežico v malti do 2,76 N/mm²). Med ozkimi trakovi močno izstopajo dobro zaključena sidranja (obe zaobljeni skupini in lastovičji rep) in preizkušanci z dobro izvedbo podlage (narebrena ali stara neravna luknjičasta opeka). Vrednosti sile na enoto površine lepljenja znašajo med 10,71 in 14,49 N/mm², kar v povprečju znaša 8-krat več v primerjavi z vsemi širokimi trakovi (CFRP in GFRM) oz. približno 6-krat več kot v primeru CFRP-trakov. Sila na enoto površine je pri preizkušancih, nasičenih z vodo, padla za 25 % v primerjavi z enakimi suhimi preizkušanci. Preizkušanci s preglednimi površinami so dosegli najnižjo silo na enoto površine.

4.2 Primerjava sipanja energije

Slika 12 prikazuje porabljeno energijo za obremenjevanje preizkušancev do dosežene trdnosti oz. porušitve. Največ energije je bilo porabljeno za porušitev preizkušancev, pri katerih je bila zaznana določena mera duktilnosti. To so preizkušanci skupine 11, ki so bili narejeni iz narebrenne opeke s stekleno mrežico v mikroarmirani cementni malti. Gre za preizkušance, katerih porušitev je večinoma nastopila v sami utrditvi (pulila in trgala se je mrežica in drobila malta), medtem ko se je druga skupina preizkušancev z mrežico v mal-



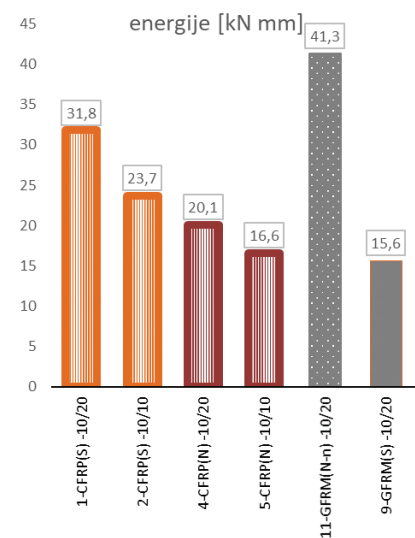
Slika 12 • Poraba energije opečnih dvojčkov s FRP-/FRM-utrditvami (za primerjavo so nakazane tudi nosilnosti).

ti (skupina 9) večinoma porušila z odlepitvijo. Pri taki krhki porušitvi je bila poraba energije pričakovano bistveno manjša. Med doseženo nosilnostjo preizkušancev teh skupin ni bilo velike razlike, razlika je bila le v duktilnosti in s tem v sipanju energije.

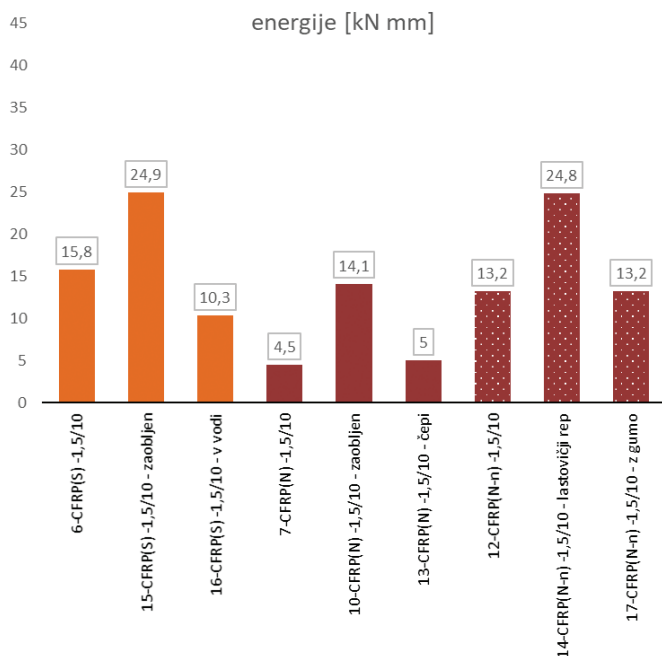
Ostali preizkušanci so trošili energijo do porušitve sorazmerno z dolžino trakov in s kvaliteto (hrapavostjo) podlage.

Glede količine porabljene energije so v primeru širokih trakov izstopali preizkušanci z daljšo sidno dolžino (slika 13) z izjemo preizkušancev 2 zaradi izrazite porušitve po opeki. V skupini enakih dolžin ozkih trakov, le z različnim sidranjem, so izrazito izstopali preizkušanci z zaobljenim koncem in preizkušanci z razširitvijo zaključka trakov v obliki lastovičjega repa (slika 14), seveda pa prav tako sorazmerno s hrapavostjo podlage.

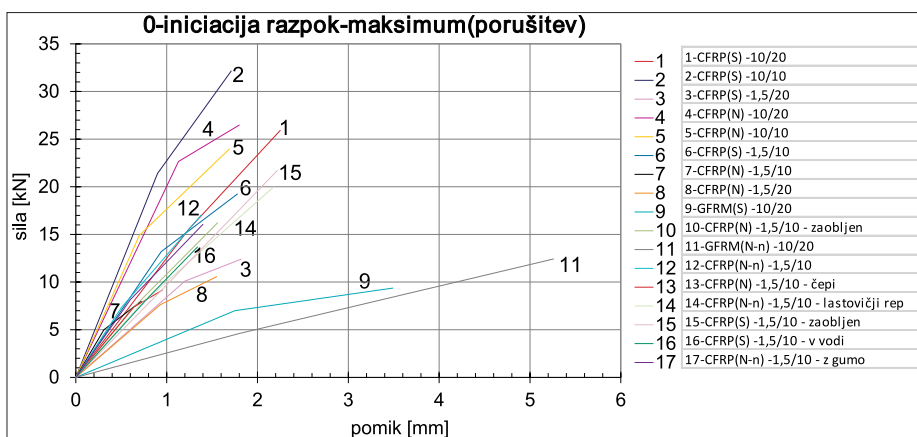
Porušitve preizkušancev (razen v enem primeru) so bile hipne (krhke). Po enakomernem, linearnem naraščanju sile in pomika smo dosegli maksimalno obremenitev, ki je hkrati bila tudi porušna sila. Stiki so se obnašali povsem neduktilno, saj je bilo razmerje med končnim pomikom in pomikom na meji elastičnosti enako 1. Kljub temu pa smo opazili točko iniciacije poškodb, pri kateri pa lahko rečemo, da se je linearno elastično področje naraščanja sile vendarle zaključilo. Te točke so bile pri enaki skupini preizkušancev dosežene pri približno enakih pomikih, v nekaterih primerih pa se sploh niso zgodile. Pri povprečju preizkušancev lahko vidimo, kako so preizkušanci po iniciaciji razpok



Slika 13 • Poraba energije v primeru širokih trakov.



Slika 14 • Poraba energije ozkih kratkih trakov z različnim sidranjem.



Slika 15 • Strižna nosilnost opečnih dvojčkov s FRP-utrditvami (0-iniciacija razpok-porušitev).

5 • SKLEPI

V članku so predstavljene strižne preiskave stikov opeke in armiranih polimerov. Opravljali smo preiskave z vnosom strižne obremenitve v stik vzporedno s stično ploskvijo. Za CFRP-preizkušance smo izbrali široke (10 cm) in ozke trakove (1,5 cm) z dvema različnima dolžinama, 10 in 20 cm, za podlago pa smo izbrali staro in novo opeko. Sprofi smo ugotavljali učinkovitost CFRP-utrditev in razvijali različne vrste sidranja. Preskušali smo 17 skupin različnih preizkušancev, praviloma s po petimi enakimi preizkušanci v posamezni skupini. Ozke trakove smo nalepili ravno, z zaobljenim koncem, s čepi ali z lastovičjim

repom. Poleg tega smo spreminjali podlago, ki je bila lahko gladka (obstoječa stara ali nova opeka), narebrna ali pod vplivom 100-% vlage (30 dni v vodi). Preiskave preizkušancev iz opeke s CFRP-/GFRM-utrditvami so v prvi vrsti pokazale, da podlaga ne sme biti pregledka. Če je pregledka, je treba podlago nujno narebrati. Ugotovili smo, da zadošča rebričenje do globine 1–2 mm s kotno brusilko, kar lahko dokaj enostavno in hitro opravimo na mestu samem kateregakoli zidu pred utrditvijo. Dosežene razlike v nosilnosti in porabi energije za doseganje porušitve stika, če primerjamo gladko in hrupavo podlago,

(točka loma krivulje na diagramu na sliki 15) pridobivali nosilnost do maksimalne sile oz. porušitve.

4.3 Primerjava nosilnosti in pomikov po iniciaciji trganja

Na sliki 15 so prikazani diagrami strižnih nosilnosti opečnih dvojčkov, utrjenih s FRP/FRM. Linearno so povezane tri točke: izhodišče diagrama, točka iniciacije razpok in meja porušitve. Naklon prve linije predstavlja povprečno togost preizkušancev posamezne skupine.

Najbolj togi so bili stiki preizkušancev iz skupin 2, 4 in 5, ki so imeli nalepljene široke trakove. Najbolj podajni so bili stiki preizkušancev iz skupin 11 in 9, ki so bili utrjeni z mrežico v malti.

so zelo velike (do 213 %). K povečanju nosilnosti in porabi energije pomembno prispevajo izboljšani načini sidranja koncev trakov. Bodisi zaokrožitev konca trakov bodisi lastovičji rep uspešno preprečijo možnost porušitve z odlepitvijo po lepilu in aktivirajo večji volumen opeke, ki jo morajo iztrgati iz opečne mase, za kar pa potrebujejo veliko več energije. Visoko nosilnost zagotavlja tudi velika površina polepljenosti s CFRP-trakovi, vendar pa ta ni sorazmerna površini nalepitve v primerjavi z uporabo ožjih trakov. V našem primeru je bila nalepitev po površini 6,6-krat večja, nosilnost pa le do 2-krat. Slabost večje polepljenosti s trakovi so višji stroški, ki pa v nasprotju z nosilnostjo naraščajo sorazmerno s površino lepljenja tako pri pripravi podlage, porabi lepila, porabi trakov itd.

Ko smo ugotovili, da so porušitve – odtrganje trakov od podlage, hipne tudi zaradi velike togosti nalepljenega sistema, smo preizkusili še vpliv dodatka tekoče gume v epoksidno lepilo, da bi povečali podajnost nalepljenega materiala. Zelo primerno nosilnost, predvsem pa malo manjšo togost in večje dosežene pomike, dosegajo preizkušanci z modificiranim epoksidnim lepilom. Rezultati prikazanih preiskav vpliva modifikacije lepila so zaradi malega števila enakih preizkušancev zgolj indikativni in osnova za nadaljevanje raziskav. Kljub temu smo spoznali, da se porušitev lahko razlikuje od večine porušitev ostalih pre-

izkušancev, če je le stik med lepilom in opeko dovolj kakovosten. Glede na način porušitev lahko sklepamo, da se napetosti enakomerno porazdelijo vzdolž traku. Posledično se opeka odtrga globinsko po celotni dolžini traku, ne le na konceh, s tem dosežemo večjo porabo energije in višjo porušno obremenitev. Ugotavljamo, da ima zamisel utrjevanja z uporabo modificiranega, podajnega lepila velik potencial. Uporaba gume v epoksidnem lepilu je dokazano uporabna. Možne so različne sestave lepila glede na vrsto modifikacijske snovi za doseganje ustrezne podajnosti stika med utrditvenimi trakovi in podlago.

Dolžina nalepljenih trakov v našem primeru ni igrala pomembne vloge. Zadoščala je že dolžina 10 cm, saj so preizkušanci z 20-cm trakovi v polovici primerov dosegli celo manjše nosilnosti od enako pripravljenih preizkušancev z 10 cm dolžine. V vseh primerih, kjer smo dosegli višje nosilnosti, pa so bile te le malo večje, in ne 2-krat, kolikor je bila površina nalepljene utrditve večja. S tem smo ovrgli trditve nekaterih avtorjev, da mora biti sidrna dolžina najmanj 20 cm, bolj pomembni sta priprava podlage in možnost kvalitetnejšega sidranja oz. zaključka trakov.

6 • ZAHVALA

Financiranje je potekalo v okviru projekta PERPETUATE in slovenske podpore Ministrstva za izobraževanje, znanost in šport RS preko sofinanciranja doktorskega študija z

Inovativno shemo 2010/2011. Zahvala gre Evropski uniji in MIZŠ. Utrditvene materiale so priskrbeli podjetja, ki jih proizvajajo. Zahvala gre podjetjem S&P Italia S.p.a za FRP-kanino

S&P C-Sheet 240 in epoksidno lepilo S&P Resin Epoxy 55, podjetju I.A.R. Srl - Rovigo Italia za karbonske trakove Carboniar® 800/1,5 in lepilo Epoxiar C64/ET ter podjetju Sika Slovenija, d. o. o., za stekleno mrežico SikaWrap®-350G Grid ter mikroarmirano cementno malto Sika® MonoTop® -722 Mur.

7 • LITERATURA

- Alcaíno, P., Santa María, H., Shear response of brick masonry walls externally retrofitted with bonded carbon fiber fabric, Proceedings of 8th Pacific Conference on Earthquake Engineering (8PCEE), Singapore, 5–7 December, 2007, Singapore, Nanyang Technological University & The New Zealand Society for Earthquake Engineering Inc., 2007.
- ElGawady, M., Lestuzzi, P., Badoux, M., Shear Strength of URM Walls Retrofitted Using FRP, Engineering Structures, 28(12): 1658–1670, 2006.
- Gostič, S., Mezgec, A., Študija učinkovitosti naprednih metod za sanacijo zidanih stavb., Raziskovalni projekt MŠZŠ Z2–3411, Ljubljana, Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport, 129 str., 2004.
- Gostič, S., Žarnić, R., Strengthening of clay–brick masonry with carbon fibre reinforced plastic strips. V: Radić, J. (ur.), Rajčić, V. (ur.), Žarnić, R. (ur.). Heritage protection–Construction aspects: Proceedings of the International Conference organized by SECON, European Construction Technology Platform, University of Zagreb and University of Ljubljana. Dubrovnik, Croatia, October 14–17, 2006. Zagreb: Secon HDGK, 2006.
- Hall, J. D., Schuman, P. M., Hamilton, H. R., Ductile Anchorage for Connecting FRP Strengthening of Under-Reinforced Masonry Buildings, Journal of Composites in Construction, Vol. 6, No. 1: p. 3–10, 2002.
- Jarc Simonič, M., Učinki utrditve opečnih zidov s plastikami, armiranimi z vlakni, Doktorska disertacija Ljubljana, UL FGG, 2018.
- Jarc Simonič, M., Gostič, S., Bosiljkov, V., Žarnić, R., In-situ and laboratory tests of old brick masonry strengthened with FRP in innovative configurations and design considerations, Bulletin of earthquake engineering, Vol. 13, No. 1: p. 257–278, 2015.
- Jarc Simonič, M., Gostič, S., Bosiljkov, V., Žarnić, R., Ispitivanje i analiza nosivosti na posmik zidova ojačanih s FRP-om = Testing and analysis of walls strengthened with FRP = Versuche und Analysen zur Scherfestigkeit durch FKV ertüchtigten Mauerwerks. Građevinar, letn. 66, št. 6: str. 533–548, 2014.
- Khalifa, A., Alkhrdaji, T., Nanni, A., Lansburg, S., Anchorage of Surface Mounted FRP Reinforcement, International Design and Construction, Vol. 21, No. 10: p. 49–54, 1999.
- Oliveira, D. V., Basilio, I., Lourenço, P. B., Experimental bond behavior of FRP sheets glued on brick masonry, Journal of composites for construction, Vol. 15, No. 1: p. 32–41, 2011.
- Ozturk, A., Kaynak, C., Tincer, T., Effects of liquid rubber modification on the behaviour of epoxy resin, European Polymer Journal 37.12 (2001): 2353–2363.
- Schwegler, G., Masonry Construction Strengthened with Fiber Composites in Seismically Endangered Zones, Proceedings, 10th European Conference on Earthquake Engineering, Dunaj, 1994.
- Tomažević, M., Gams, M., Oblak, A., Protipotresno utrjevanje opečnih zidov s kompozitnimi oblogami, Gradbeni vestnik, 60(10): 246–257, 2011.
- Triantafyllou, T. C., Fardis, M. N., Strengthening of Historic Masonry Structures With Composite Materials, Materials and Structures, 30(8): 486–496, 1997.
- Triller, P., Gams, M., Tomažević, M., Seismic behaviour of multistorey strengthened URM masonry shear walls with openings: an experimental study, 16th World Conference on Earthquake, 16WCEE. 2017.