

asist. dr. David Antolinc, univ. dipl. inž. grad.
david.antolinc@fgg.uni-lj.si
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in
geodezijo,
Jamova 2, 1000 Ljubljana



Robi Ponjavič, dipl. inž. grad.
robi.ponjavic@diviar.com
Diviar, d. o. o.,
Rožna dolina, cesta XI/30, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek
UDK 624.046.2:691.175

NOSILNOST NATEZNO OBREMENJENIH VIJAČNIH PREKLOPNIH SPOJEV S STEKLENIMI VLAKNI UTRJENIH PLOŠČATIH POLIMERNIH KOMPOZITNIH ELEMENTOV

TENSILE LOAD BEARING CAPACITY OF BOLTED LAP JOINTS MADE OF GLASS FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITE STRIP PROFILES

Povzetek

V prispevku so najprej izpostavljeni glavni izzivi pri snovanju konstrukcij, v celoti narejenih iz z vlakni ojačanih polimernih kompozitnih elementov oz. armirane plastike. Poseben izziv predstavljajo spoji takšnih elementov, zato v nadaljevanju prispevka obravnavamo pogosto uporabljene natezno obremenjene vijake spoje iz polimernih kompozitnih ploščatih elementov, ojačanih s steklenimi vlakni (GFRP), spojenih z enim jeklenim vijakom M24. Glede na priporočila za dimenzioniranje takšnih spojev iz tuje literature in predvsem smernice za razvoj standarda Evrokod za projektiranje konstrukcij iz armirane plastike smo določili tri robne oddaljenosti luknje za vijak in nato izvedli natezni preizkus spojev. Robna oddaljenost središča luknje je bila odvisna od premera spojnega vijaka d in je od roba priključnih elementov znašala $1,5d$, $3,5d$ in $7d$. S testi smo preverili ustreznost v smernici »Prospect for new guidance in the design of FRP« ([Ascione, 2016]) podanih analitičnih izrazov za določitev nosilnosti natezno obremenjenih spojev in hkrati tudi porušni mehanizem, ki se vzpostavi zaradi bočnega pritiska povezovalnega vijaka. Na osnovi analize eksperimentalnih rezultatov so na koncu podani komentarji na omejitve za zasnovano in načrtovanje natezno obremenjenih spojev iz ploščatih FRP-elementov z enim vijakom v navezavi na predhodno omenjene smernice. Iz primerjave eksperimentalnih rezultatov z vrednostmi, dobljenimi z analitičnimi izrazi, lahko sklepamo, da z analitičnimi rezultati dobimo zelo konservativne rezultate in da bi analitične izraze lahko optimizirali.

Ključne besede: kompozit, s steklenimi vlakni armirana plastika (GFRP), bočni pritisk, natezno obremenjen vijakeni spoj, nosilnost, porušni mehanizem

Summary

The present article highlights the main technical and design challenges of using fiber reinforced plastics (FRP) composite materials as the main structural material. Connection details between composite FRP elements present a special challenge. Therefore, within the present study, commonly used bolted lap connections assembled of glass fiber reinforced polymer composite GFRP plates, connected with one steel bolt M24, were studied and analyzed. According to the design recommendations from the literature and particularly from the EC standard development guidance for composite FRP structural design for this type of connections, three different distances e between the loaded GFRP plate edge and the center of the bolt hole with diameter d_0 were defined. The first distance of the hole centerline e was $1.5d$, second $3.5d$ and the third one at a distance of $7d$ from the edge of the GFRP plate. The tensile tests were conducted in order to verify the adequacy of the analytical expressions provided in document »Prospect for new guidance in the design of FRP« ([Ascione, 2016]), which is proposed for the design of bolted lap connections, and the definition of their failure mechanisms. Based on the experimental analysis results, the comments on the design limitations provided in the above mentioned guidelines are given for the considered lap joints. The comparison of the experimental and analytical results shows that the analytical expressions give very conservative results and that these expressions could be optimized.

Key words: Composite, Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP), bearing stress, bolted connection, tension load capacity, failure mechanisms

1 UVOD

Z vlakni utrjeni polimerni kompozitni materiali oz. armirane plastike so napredni in visoko nosilni materiali, sestavljeni iz dveh ali več komponent, običajno iz armirnih vlaken v polimerni matrici [Žarnić, 2002]. Kljub temu da armirane plastike po svojih lastnostih predstavljajo velik potencial za uporabo v konstrukcijske namene, je v Sloveniji gradbena stroka v primerjavi z drugimi panogami dokaj konservativna pri uporabi le-teh v praksi in jih sprejema z zadržki. Običajno se jih v gradbeništvu uporablja v obliki trakov in plošč predvsem za sanacije in ojačitve dotrajanih ali poškodovanih konstrukcijskih ele-

mentov. postavljen na podpore je bila zabetonirana tlačna AB-plošča z armaturnimi palicami iz kompozitne armirane plastike. Za prevzem strižnih napetosti in za preprečitev lokalnega uklona kompozitnega nosilca na mestu podpor pa je bilo vgrajeno AB-polnilo v tankostenske nosilce iz armirane plastike in med njimi.

Obstaja veliko število že izvedenih mostnih konstrukcij, ki so v celoti narejene iz armirane plastike, predvsem v primerih, kjer pride do izraza njihova majhna teža, visoka nosilnost, korozijska odpornost in odpornost proti utrujanju. Običajno so to palični nosilni konstrukcijski sistemi iz pultrudiranih profilov, narejenih iz armirane plastike, ki so spojeni z vijačnimi spoji,



Slika 1. Spodnji del kompozitnega nosilca, pripravljen v delavnici (levo), in hibridni sovprežni most, sestavljen iz spodnjega FRP-nosilca in tlačne AB-plošče, čez reko Ryjak na Poljskem (desno) [Siwowski, 2019].

mentov. Kljub temu po svetu že obstaja večje število zgrajenih gradbenih objektov, kjer kompozitne armirane plastike nastopajo v delih ali v celoti kot primarni material nosilne konstrukcije. Za primer dobre prakse uporabe kompozitne armirane plastike v konstrukcijske namene predstavlja hibridna sovprežna izvedba mostnih konstrukcij, kot je to prikazano na sliki 1, za primer študije postavitve mostu na Poljskem čez reko Ryjak [Siwowski, 2019]. V tem primeru je spodnji mostni nosilec, ki je obremenjen natežno in strižno, narejen iz laminatov kompozitne armirane plastike kot tankostenski profil z vgrajenimi strižnimi čepi (slika 1, levo). Na vnaprej pripravljen nosilec in

kot je prikazano na sliki 2. Most za pešce v Pontresini (slika 2, levo) v švicarskih Alpah, zgrajen leta 1997, je eden izmed prvih tovrstnih mostov v svetovnem merilu in je bil že dvakrat prepeljan v laboratorij na podrobnejši pregled in testiranje. Po 17 letih se je izkazalo, da je matrica iz časa proizvodnje elementov občutljiva za UV-sevanje sonca [Keller, 2015]. V drugem primeru mostu za pešce v Lleidi (Španija), ki je v celoti sestavljen iz pultrudiranih profilov, povezanih z vijačnimi spoji, in poteka čez železniško progo, gre za enega daljših tovrstnih mostov, pri katerem glavna razpetina znaša 38 m [Pedelta, 2021]. Majhna masa mostu v Pontresini omogoča transport tudi s helikop-



Slika 2. Most za pešce v Pontresini (levo) [Keller, 2016] in most za pešce v Lleidi čez železnico [Structurae, 2021], ki sta v celoti narejena iz profilov, narejenih iz armirane plastike in povezanih z vijačnimi spoji.

terjem, kar je bil eden izmed projektnih pogojev. Koncept lahke mostne konstrukcije v Lleidi pa omogoča montažo celotne mostne konstrukcije ob premostitveni razpetini in nato postavitev celotne konstrukcije z dvigalom na podpore v zelo kratkem času.

Prednosti uporabe kompozitov iz armirane plastike pri gradnji nosilne konstrukcije se kažejo predvsem v majhni lastni teži, visoki nosilnosti in korozijski odpornosti. Glavni izzivi in problemi pri takšnih konstrukcijah se pojavijo pri zagotavljanju mejnega stanja uporabnosti (omejevanje pomikov) [Koren, 2017], pri izvedbi spojev posameznih konstrukcijskih elementov, zagotavljanju požarne odpornosti in odpornosti proti UV-sevanju sonca. Na nivoju posameznih elementov iz armirane plastike je ustrezna kakovost lahko zagotovljena v tovarni pri proizvajalcu v kontroliranih pogojih, večji problem pa v končni fazi za projektanta predstavljajo spoji, katerim je namenjen velik del nastajajočega standarda Evrokod. V praksi je možno povezati konstrukcijske elemente iz armirane plastike z lepljenjem, vijakanjem in kombinacijo obojega. Najbolj togi in varni so kombinirani spoji, medtem ko so vijaki najbolj podajni, vendar so po drugi strani najlažji za izvedbo in kontrolo.

Glede na to, da vijačni spoji predstavljajo največji potencial za uporabo pri gradnji lahkih paličnih nosilnih konstrukcij za potrebe v gradbeništvu, sta bili narejeni študija in eksperimentalna analiza osnovnega vijačnega spoja z enim vijakom. V nadaljevanju tega prispevka je predstavljena eksperimentalna analiza 12 preizkušancev, na katerih smo preverili vpliv robne razdalje luknje za spojni vijak na bočno nosilnost s steklenimi vlakni utrjene polimerne kompozitne (GFRP) plošče za 3 različne razdalje. Hkrati smo preverili tudi izraze za kontrolo nosilnosti obravnavanih vijačnih spojev, podanih v predlogu za nastajajoči standard Evrokod za projektiranje kompozitnih konstrukcij iz armirane plastike.

2 GLAVNI IZZIVI PRI KONSTRUKCIJAH, IZDELANIH V CELOTI IZ ARMIRANE PLASTIKE

Glavni zadržki pred širšo uporabo armirane plastike za gradnjo konstrukcij, v celoti narejenih iz armirane plastike v Sloveniji, v osnovi izvirajo iz pomanjkanja izkušenj gradbene stroke s temi materiali in iz manjkajočega standarda Evrokod za projektiranje konstrukcij iz armirane plastike, ki je sicer v nastajanju [Ascione, 2016]. V zadnjem obdobju, še posebej po sprejetju evropskega zelenega dogovora, se veliko pozornosti namenja krožnemu gospodarstvu in zahtevam, ki jih morajo izpolnjevati tudi gradbeni materiali in konstrukcije, saj je gradbeništvo velik porabnik materialov z velikim ogljičnim odtisom. Glede na že omenjene zadržke uporabe armiranih plastik v gradbeništvu in za spodbudo iskanja rešitev, ki sovpadajo s konceptom krožnega gospodarstva, je bila pred kratkim pri Gospodarski zbornici Slovenije organizirana spletna konferenca z naslovom »Uporaba ojačenih polimernih kompozitov v gradbeništvu krožnega gospodarstva«, ki je tudi v celoti objavljena na njihovi spletni strani [GZS, 2021]. Na konferenci so bili še posebej osvetljeni izzivi in tudi priložnosti za uporabo armiranih plastik v gradbeništvu. Eden izmed glavnih izzivov je reciklaža armiranih plastik. Narava armiranih plastik je namreč takšna, da jih je po odsluženju dobi težje ali celo nemogoče razstaviti na

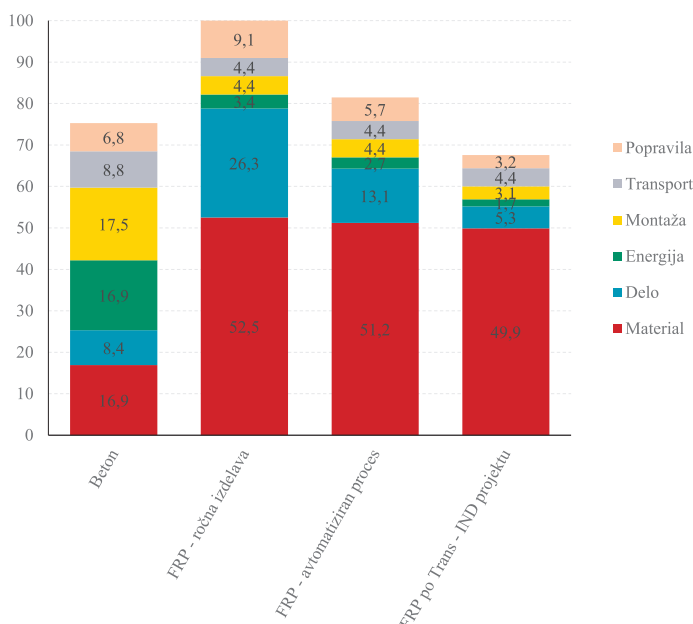
posamezne komponente. S tem ne zadostimo pogoju t. i. ekodizajna, ki je temelj krožnega gospodarstva. Najbolj primerne metode za reciklažo armiranih plastik so sicer piroliza, energijska in surovinska izraba pri proizvodnji cementa in ponovna uporaba v druge namene. Ogljični odtis armiranih plastik lahko zmanjšamo z uporabo polimernih matric, pridobljenih iz naravnih materialov, če pa mu dodamo še naravna ojačitvena vlakna, dobimo kompozit z minimalno vgrajeno energijo in s tem praktično zanemarljiv ogljični odtis materiala [Smiths, 2016].

Konstrukcijski elementi iz armiranih plastik so običajno narejeni iz tankostenskih laminatov, kjer so posamezne lamele armirane z vlakni v različnih medsebojnih smereh. To nam omogoča, da lahko pri projektiranju takšnega elementa optimiziramo nosilnost elementov v posameznih smereh za specifično obremenitev. Možnost projektiranja od nivoja mikromehanike do globalne analize konstrukcije po drugi strani pomeni zelo kompleksno in dolgotrajno analizo, kar v kombinaciji s pomanjkanjem izkušenj in standarda za projektiranje predstavlja glavno oviro pred splošnim sprejetjem armiranih plastik v praksi.

Konstrukcijski elementi iz armiranih plastik so zelo trajni, odporni proti koroziji in v splošnem zahtevajo manj vzdrževanja. Kljub temu so se na prvih primerih konstrukcij iz armirane plastike (npr. most v Pontresini, slika 2, levo) pokazale težave zaradi propadanja površine polimerne matrice pod vplivom sevanja UV-žarkov, kar povzroča t. i. »cvetenje vlaken«. Ta problem se danes rešuje z nanosom zaščitnega poliestrskega sloja (»gel coat«), ki varuje matrico pred propadanjem zaradi UV-sevanja.

Navsezadnje pomembno vlogo pri uvedbi armiranih plastik v prakso igra tudi cena materiala, ki je bistveno večja kot pri konvencionalnih konstrukcijskih materialih. V okviru evropskega projekta Trans-IND, pri katerem je v preteklosti sodeloval tudi Gradbeni inštitut ZRMK, so razvijali stroškovno učinkovit konstrukcijski sistem mostne konstrukcije, kjer armirane plastike nastopajo v vlogi glavnega konstrukcijskega materiala [Jarc Simonič, 2010]. Na sliki 3 je grafično prikazana primerjava stroškov za izgradnjo mostne konstrukcije s konstrukcijskim sistemom, predstavljenim v uvodu na sliki 1, za primer v čisti armiranobetonski izvedbi, ročni izvedbi iz armirane plastike, avtomatizirani izvedbi iz armirane plastike in še izboljšani avtomatizirani izvedbi iz armirane plastike ([Jarc Simonič, 2010], [Trans-IND, 2012]). Očitno je strošek materiala pri armiranobetonski izvedbi približno trikrat manjši, medtem ko je strošek montaže in vložene energije bistveno večji pri armiranobetonski izvedbi v primerjavi z varianto iz armirane plastike. Veliko stroškov pri kompozitni varianti lahko privarčujemo, če ročno izdelavo laminata iz armirane plastike zamenjamo z avtomatiziranim procesom, ki so ga v okviru projekta Trans-IND še dodatno optimirali. S tem so pokazali, da je možno strošek kompozitne mostne konstrukcije iz armirane plastike približati ceni običajne armiranobetonske izvedbe ob upoštevanju vseh stroškov v življenjski dobi objekta. Čeprav je v okviru projekta bilo pokazano, da je varianta z optimiziranim proizvodnim procesom mostnih nosilcev iz armirane plastike cenovno konkurenčna s klasično AB-izvedbo, do uporabe takšnega sistema v Sloveniji še ni prišlo. Razlogov je več, med glavnimi pa je zagotovo manjkajoči standard Evrokod za projektiranje konstrukcij iz armiranih plastik. Drugi glavni razlog, ki je povezan tudi s prvim, pa je pomanjkanje izkušenj gradbene stroke

z armiranimi plastikami v funkciji glavnega konstrukcijskega materiala. V primeru izbire konstrukcijskega sistema z armirano plastiko pa bi stroški projektiranja zaradi pomanjkanja izkušenj in bolj kompleksne analize verjetno nekoliko spremenili stroškovna razmerja na sliki 3 v korist klasični AB-izvedbi.



Slika 3. Relativna primerjava stroškov za izdelavo AB- in kompozitne mostne FRP-konstrukcije [Jarc Simonič, 2010].

2.1 Spoji elementov iz armirane plastike in smernice za njihovo načrtovanje in dimenzioniranje

Za dimenzioniranje in kontrolo ustreznosti posameznih kompozitnih elementov iz armirane plastike in spojev med njimi obstajajo različne smernice in interni priročniki posameznih večjih proizvajalcev kompozitnih armiranih plastik, kot je na primer priročnik Fiberline Design Manual [Thorning, 2003] podjetja Fiberline. Med najbolj znanimi splošnimi priročniki je že nekoliko zastareli EUROCOMP Design Code and Handbook [Clark, 1996], ki je bil pripravljen v obliki in formatu, podobnem, kot je to pri obstoječih Evrokodih za projektiranje konstrukcij. V nekaterih državah obstajajo tudi nacionalne smernice in priporočila za projektiranje kompozitnih konstrukcij iz armirane plastike ([CROW-CUR, 2019], [CD 368, 2020], [CNR, 2008], [ASCE, 2010], [ACMA, 2016], [DIBt, 2019], [BÜV, 2014], [DIN, 2016], [DNV, 2016]), na osnovi katerih je nastalo znanstveno in tehnično poročilo z naslovom »Prospect for new guidance in the design of FRP« [Ascione, 2016], ki ga je pripravila delovna skupina CEN/TC250 WG4 Evropskega komiteja za standardizacijo. V poročilu so zbrani vsi relevantni podatki, navodila, primeri dobre prakse in postopki s področja projektiranja konstrukcij iz armiranih plastik in je bilo napisano kot osnova za razvoj bodočega standarda Evrokod za projektiranje konstrukcij iz armiranih plastik. Obstoječi priročniki se med sabo razlikujejo predvsem v varnostnih faktorjih, koncepti dimenzioniranja elementov iz armiranih plastik in spojev med njimi pa so si podobni. V nadaljevanju smo se osredotočili na pravila za kon-

trolo nosilnosti natezno obremenjenih vijačnih spojev z enim vijakom, ki so obravnavana v tehničnem poročilu in smernici »Prospect for new guidance in the design of FRP« [Ascione, 2016]. V priročniku so za tovrstne vijačne spoje ploščatih elementov iz armirane plastike navedeni 4 možni porušni mehanizmi. Od tega trije predstavljajo porušitev priključnih ploščatih elementov iz armirane plastike in en prestrig jeklenega vijaka. V preglednici 1 so prikazane tri možne oblike porušitve ploščatih priključnih elementov iz armirane plastike (PO1, PO2 in PO3) z navedenimi izrazi za kontrolo nosilnosti in možnost nastanka določene porušne oblike. Dodatno sta prikazani še dve porušni obliki (PO4 in PO5), ki sta navedeni v priročniku Fiberline Design Manual [Thorning, 2003] in sta v dokumentu, ki ga je pripravila delovna skupina CEN/TC250 WG4, izpuščeni. Oblika porušnega mehanizma natezno obremenjenega spoja z enim vijakom je odvisna od konfiguracije premera vijaka d , debeline t in širine w priključnega ploščatega elementa iz armirane plastike in robne oddaljenosti e luknje za vijak v priključnem FRP-elementu. Pomen spremenljivk $f_{t,0}$, $f_{c,0}$, $f_{t,90}$, $f_{c,90}$, $f_{br,0}$, $f_{br,90}$ in f_r , ki predstavljajo trdnostne karakteristike materiala armirane plastike, je predstavljen v preglednici 2, na skicah in v izrazih pa nastopajo še sledeče spremenljivke:

- $b = d$ širina območja ob robu plošče iz armirane plastike, kjer se pojavijo natezne napetosti v smeri pravokotno na potek obremenitve,
- d_0 premer odprtine v lameli iz armirane plastike za jeklen spojni vijak,
- v kot, pod katerim se bočni pritisk pred vijakom razporedi v poševni smeri glede na smer obremenjevanja,
- $V_{Sb,d}$ sila, ki se prenese z vijaka na spojni element (maksimalno je strižna nosilnost vijaka),
- $F1, F2, F3$ komponente sile, ki se prenesejo iz vijaka na priključni element iz armirane plastike,
- $f_{c,v}$ minimalna tlačna trdnost priključenega elementa iz armirane plastike pod kotom v v diagonalni smeri glede na potek glavnih utrditvenih vlaken oz. smeri obremenjevanja,
- θ kot med osjo pultruzije oz. smeri glavnih utrditvenih vlaken in smerjo obremenitve elementa iz armirane plastike.

Za porušno obliko PO1, ki se vzpostavi v primeru pretrga natezno obremenjenih vlaken pasnice iz armirane plastike ob spojnem jeklenem vijaku (pretrg neto prereza), sta za izračun nosilnosti neto prereza navedena dva izraza. Prvi se uporablja, če je smer prenosa obtežbe iz spojnega vijaka na pasnico iz armirane plastike pod manjšim kotom θ (med 0° in 5°) glede na potek glavnih ojačitvenih vlaken in smeri pultruzije elementa, drugi pa za primer, ko je kot θ med 5° in 90° . V izrazih 1) in 2) nastopajo še spremenljivke za faktor koncentracije napetosti k_{sc} , za katerega se upošteva, da je enak 3,75, če z dodatno analizo ne poznamo bolj natančne vrednosti. Porušna oblika PO2 nastopi v primeru prekoračitve tlačne trdnosti materiala armirane plastike na neposrednem stiku s spojnim vijakom v smeri glavnih ojačitvenih vlaken $f_{br,0}$ ali v smeri pravokotno na potek glavnih ojačitvenih vlaken $f_{br,90}$ zaradi preseženih bočnih pritiskov. Za pasnico iz armirane plastike, pri kateri so glavna ojačitvena vlakna pod kotom θ med 0° in 5° glede na smer obremenjevanja preko spojnega vijaka, uporabimo izraz 3), medtem ko za večje kote θ med 5° in 90° velja izraz 4). Nosilnost na bočni pritisk je treba še dodatno reducirati s faktor-

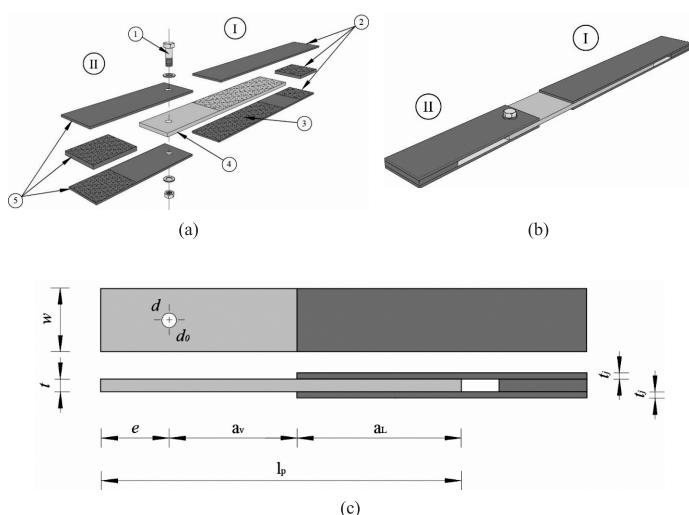
	Porušna oblika	Opis porušitve	Izraz za kontrolo nosilnosti
Porušne oblike iz tehničnega poročila CEN/TC250 WG4		Natezna porušitev vlaken po neto prerezu.	za $0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$ 1) $V_{Sb,d} \leq \frac{1}{k_{tc}} f_{t,\theta} (w-d_0) t$
		Tlačna porušitev zaradi bočnih pritiskov.	za $0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$; $k_{cc} = \left(\frac{d_0}{d}\right)^2$ 3) $V_{Sb,d} \leq \frac{1}{k_{cc}} f_{br,0} d_0 t$
		Strižna porušitev v strižnih ravninah pred vijakom.	5) $V_{Sb,d} \leq f_\tau (2e-d) t$
Dodatno po Fiberline design manual		Cepilna porušitev pred vijakom v vzdolžni smeri.	6) $\frac{F_1}{b * t} \leq f_{t,90}$ kjer je $b \cong d$
		Strižna porušitev diagonalno na vlakna pred vijakom.	7) $\frac{F_2}{d * t} \leq f_{c,v}$

Preglednica 1. Porušne oblike z opisi in izrazi za kontrolo nosilnosti spojev ploščatih elementov iz armirane plastike z enim vijakom (povzeto po [Ascione, 2016] in [Thorning, 2003]).

jem koncentracije tlačnih napetosti pred spojnim vijakom k_{cc} , ki je določen s kvadratom razmerja med premerom odprtine v priključnem elementu iz armirane plastike d_0 in premerom spojnega vijaka d . Možnost nastanka porušne oblike PO3 se preveri z izrazom 5), ta se vzpostavi v primeru premajhne robne oddaljenosti e ali prešibke strižne trdnosti materiala armirane plastike. Porušni obliki PO4 in PO5, ki ju je dodatno obravnaval priročnik Fiberline Design Manual, pa obravnavata še primera, kjer pride do presežene natezne trdnosti $f_{t,90}$ pred vijakom v smeri pravokotno na smer obremenjevanja »cleavage« in do presežene tlačne trdnosti materiala armirane plastike $f_{c,v}$ pod kotom v pred vijakom. Kontrolni izrazi za možnost nastanka porušnih mehanizmov PO4 in PO5 se izvedeta z izrazoma 6) in 7).

3 OPIS PREIZKUŠANJEV IN NATEZNEGA PREIZKUSA SPOJA

Osnovni namen preiskave je bil preveriti odziv in nosilnost kompozitne priključne plošče iz armirane plastike na bočni pritisk za tri različne robne oddaljenosti luknje za spojni vijak. Priključne elemente iz armirane plastike smo pridobili od danskega proizvajalca Fiberline Composites A/S v obliki 12 pravokotnih lamel iz plastike, armirane s steklenimi vlakni (GFRP) E-glass z oznako E17. Proizvajalec Fiberline Composites proizvaja pultrudirane konstrukcijske profile iz armirane plastike v skladu z evropskim standardom EN 13706 [EN, 2002]. Ta



Slika 4. (a) 3D-pogled na sestavne dele preizkušanca, (b) 3D-pogled na sestavljeni preizkušanelec ter (c) tloris in vzdolžni stranski pogled desnega dela preizkušanca (I) z oznakami osnovnih spremenljivk.

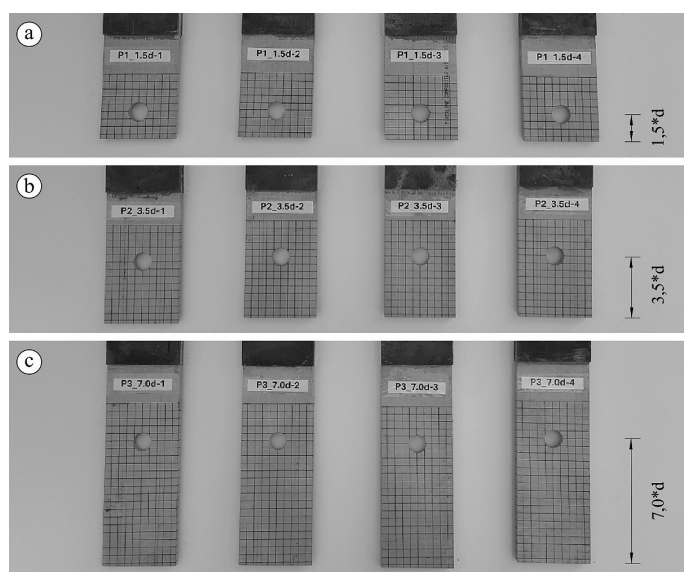
standard predpisuje minimalne zahteve za kvaliteto, toleran-
ce, trdnost, togost in površino pultrudiranih konstrukcijskih
profilov iz armirane plastike in jih deli v kategoriji E17 in E23.
Za kategorijo profilov E23, pri katerih znaša modul elastičnosti
v smeri ojačitvenih vlaken 23 GPa, veljajo strožje zahteve za
kvaliteto v primerjavi s kategorijo E17, pri kateri znaša modul
elastičnosti 17 GPa [Fiberline, 2021]. Glavna armirna vlakna so
potekala vzdolž preizkušancev, matrica pa je bila iz poliestra

Kvaliteta materiala		E17
Natezna trdnost v smeri vlaken, 0° [MPa]	$f_{t,0}$	170
Tlačna trdnost v smeri vlaken, 0° [MPa]	$f_{c,0}$	170
Natezna trdnost v smeri pravokotno na potek vlaken, 90° [MPa]	$f_{t,90}$	30
Tlačna trdnost v smeri pravokotno na potek vlaken, 90° [MPa]	$f_{c,90}$	50
Kontaktna nosilnost na stiku z vijakom v smeri vlaken – nosilnost na bočni pritisk, 0° [MPa]	$f_{br,0}$	90
Kontaktna nosilnost na stiku z vijakom v smeri pravokotno na potek vlaken – nosilnost na bočni pritisk, 90° [MPa]	$f_{br,90}$	50
Strižna trdnost [MPa]	f_{τ}	15
Modul elastičnosti v smeri ojačitvenih vlaken in pultruzije, 0° [GPa]	$E_{t,0}$	17
Modul elastičnosti v prečni smeri glede na potek ojačitvenih vlaken in pultruzije, 90° [GPa]	$E_{t,90}$	5

Preglednica 2. Mehanske karakteristike obravnavanega materiala armirane plastike (kategorija kvalitete E17) v različnih smereh in v suhih pogojih ([Fiberline, 2021], [EN 13706-3, 2002]).

z dodanim aditivom za preprečevanje širitve ognja (»Isophatic polyester P4506 Fireretardant«). Vse preizkušane lamelle so imele dodatno še površinsko zaščito pred UV-žarki in korozivnim okoljem. Osnovne mehanske karakteristike preizkušancev iz armirane plastike v smeri glavnih ojačitvenih vlaken (0°) in v smeri pravokotno na potek glavnih ojačitvenih vlaken (90°) so podane v preglednici 2. Dobavljene lamelle iz armirane plastike so bile širine 100 mm, debeline 10 mm in dolžine 600 mm. Glede na dimenzije lamelnih preizkušancev in izraze, navedene v prejšnjem poglavju, smo določili premer vijaka d , ki je za obravnavano širino w priključne lamelle znašal 24 mm, kvaliteto vijaka pa smo izbrali 8.8. Luknje za vijake v preizkušanih lamelah d_0 so bile po navodilih smernice »Prospect for new guidance in the design of FRP« [Ascione, 2016] povečane za 1 mm glede na premer d vijaka in so torej bile velikosti 25 mm.

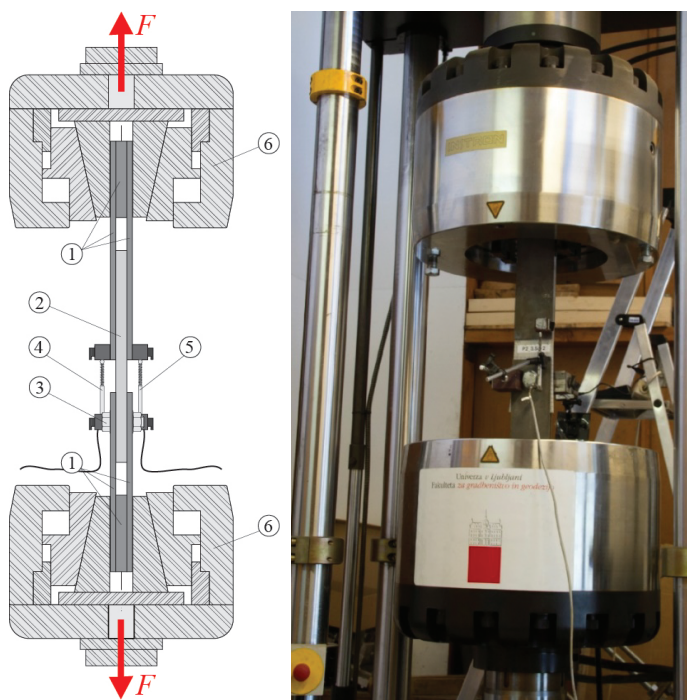
Končni preizkušanelec je bil sestavljen iz dveh delov, kakor je prikazano na sliki 4. Prvi del je sestavljen iz s steklenimi vlakni armirane polimerne lamelle, lepljene z dvokomponentnim epoksidnim lepilom »Sikadur 330« med dve preklopni jekleni pločevini z jeklenim distančnikom. Drugi del je sestavljen iz dveh preklopnih jeklenih pločevin in distančnika debeline 10 mm. Za lažjo predstavbo sestave preizkušancev je na sliki 4(a) prikazan 3D-pogled na sestavne dele preizkušancev v razstavljeni obliki, na sliki 4(b) pa je prikazan 3D-pogled na sestavljeni preizkušanelec. Dodatno sta na sliki 4(c) prikazani še tloris in vzdolžni stranski pogled desnega dela preizkušanca (oznaka I) z označenimi spremenljivkami za analizo pomembnih dimenzij. Izbrane jeklene preklopne pločevine so bile kvalitete S235, širine $w = 100$ mm in debeline $t_f = 5$ mm, kar bistveno presega nosilnost preizkušane lamelle iz armirane plastike, s čimer zagotovimo porušitev lamelle iz armirane plastike med preizkušanjem.



Slika 5. Tri serije preizkušancev P1, P2 in P3 z različnimi robnimi oddaljenostmi središča luknje spojnega vijaka e (1,5d, 3,5d in 7d) od spodnjega roba preizkušane plošče iz armirane plastike.

Parameter, ki smo ga spreminjali pri preizkušanjih, je bila robna razdalja e med središčem luknje do prostega roba, ki je pravokotna na smer delovanja sile v preizkušani plošči iz armirane plastike, kakor je prikazano na sliki 5. Preizkušanci so razdeljeni v 3 serije (P1, P2, P3), kjer ima vsaka serija po 4 enake preizkušance. Na sliki 5(a) je prikazana serija P1 z robno razdaljo središča luknje vijaka $e=1,5d=1,5 \cdot 24 \text{ mm}=36 \text{ mm}$ na preizkušani plošči iz armirane plastike. Preostali dve seriji preizkušancev P2 in P3 sta prikazani na slikah 5(b) in 5(c) z robnimi razdaljami središča luknje v preizkušani plošči iz armirane plastike $e=3,5d=84 \text{ mm}$ (P2) in $e=7,0d=168 \text{ mm}$ (P3).

Spoje smo nato natezno obremenjevali do porušitve in pri tem spremljali povprečni relativni pomik vijaka glede na nepomično prilepljeno jekleno vilico, preko katere smo posamezen preizkušane fiksirali v čeljusti trgalnega stroja. Spremljali in beležili smo tudi silo, potrebno za izvedbo nateznega testa spoja do porušitve. Obremenjevanje preizkušance smo izvajali s hitrostjo $0,025 \text{ mm/s}$. Prav tako smo spremljali in registrirali nastanek prvih večjih poškodb in porušnega mehanizma preizkušancev. Na sliki 6 levo je shematično predstavljeno vpetje preizkušanca v napravo in pritrditev zunanjih induktivnih merilnih naprav (LVDT) za merjenje pomika: 1 – jeklene vilice z distančnikom, 2 – preizkušane iz armirane plastike, 3 – vijak spoja s kratkim navojem, matico in podložko, 4 – induktivni merilec pomikov (LVDT1), 5 – induktivni merilec pomikov (LVDT2), 6 – čeljust hidravlične preizkuševalne naprave Instron. Na sliki 6 desno je prikazana postavitev testa v laboratoriju pred začetkom izvedbe nateznega preizkusa spoja.

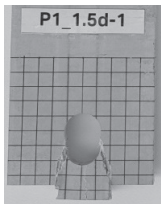
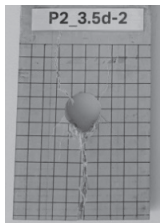
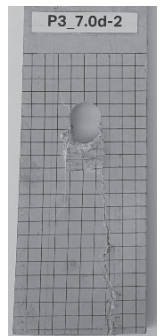


Slika 6. Skica vpetja preizkušanca in namestitve induktivnih merilcev pomikov LVDT1 in LVDT2 (levo) in slika postavitve testa v laboratoriju (desno).

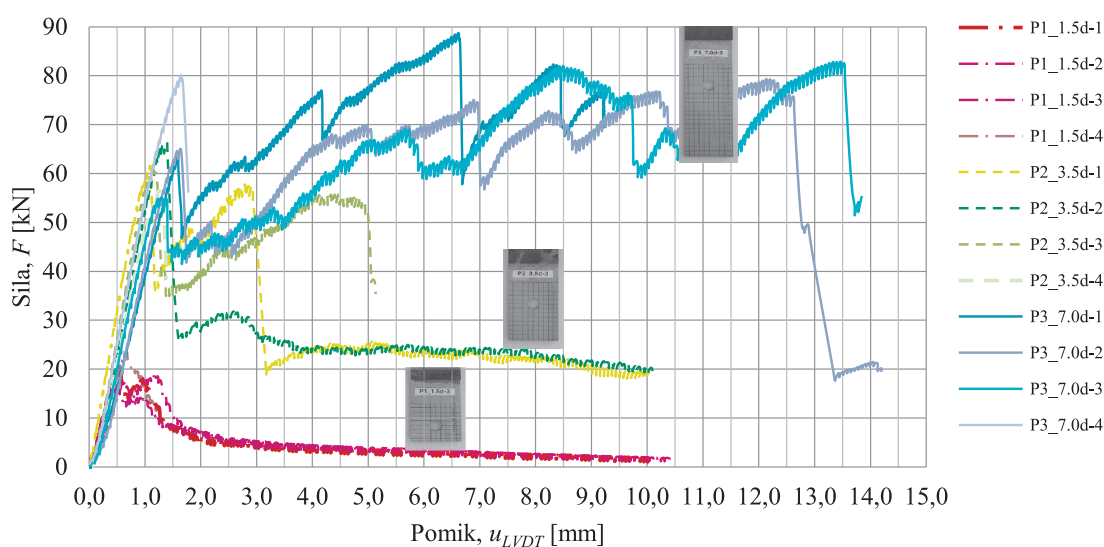
4 REZULTATI NATEZNEGA PREIZKUSA SPOJA

V preglednici 3 so prikazane sile ob nastanku prve poškodbe materiala $F_{vijaka,1}$, sile ob porušitvi $F_{vijaka,P}$, pripadajoča pomika u_1 in u_P ter oblike prvih poškodb in končnih porušitev spoja, ki smo jih zaznali. Iz rezultatov je razvidno, da spoji P1 z najkrajšo robno razdaljo ($e = 1,5d$) od središča vijaka do roba plošče iz armirane plastike nimajo velike nosilnosti v primerjavi z ostalimi variantami robne razdalje odprtine e . Povprečna nosilnost takih spojev ($F_{vijaka,1} = 19,5 \text{ kN}$) znaša ob nastanku prve poškodbe tretjino nosilnosti spojev z daljšo razdaljo e in izkazuje izrazito ter pričakovano krhko dokončno porušitev. Spoj se praktično takoj po nastanku prve poškodbe hipno poruši. V vseh primerih se pojavi strižna porušitev pred vijakom (PO3), prikazana na sliki v preglednici 3. Pri spojih z oznako P2 in z robno oddaljenostjo $3,5d$ se prva poškodba v obliki ovalizacije luknje in prvi padec sile zgodi pri večjih vlečnih silah, v povprečju pri $61,3 \text{ kN}$. V dveh primerih spojev P2 pride do končne cepilne porušitve lamele iz armirane plastike pred vijakom v vzdolžni smeri (PO4 v preglednici 1), v enem primeru pa do strižne porušitve (PO3) pred vijakom v vzdolžni smeri. Pri spojih z razdaljo $7,0d$ je podobno kot pri spojih P2 s srednjo razdaljo e najprej presežen bočni pritisk, s čimer se formira večja ovalizacija luknje in porušna oblika PO2 pred vijakom v vzdolžni smeri pri povprečni vlečni sili 65 kN . Z nadaljevanjem obremenjevanja spoja P3 do popolne odpovedi spoja pa smo na koncu dobili strižno porušno obliko PO3.

Na sliki 7 je prikazana primerjava odziva spojev tudi pri večjih povprečnih pomikih, potem ko na kompozitni lameli že nastanejo prve poškodbe. Razlike med pomiki, izmerjenimi s senzorji LVDT1 in LVDT2, so bile relativno majhne in so povzročile zanemarljive rotacije spojnih vijakov, ki so znašale manj kot $0,01 \text{ rad}$. Z rdečimi odtenki barv (črtopična črta) so prikazani rezultati za preizkušance z najkrajšo robno razdaljo središča luknje e v plošči iz armirane plastike. Po nastanku prve poškodbe lahko opazimo, da obremenitev pri spojih z majhno robno oddaljenostjo e močno upade in z večanjem pomikov ne narašča. Pri spojih z daljšo robno oddaljenostjo središča luknje e prav tako opazimo znaten padec sile po nastanku prve poškodbe, ki pa se z nadaljnjim obremenjevanjem večkrat ponovno zviša in v nekaterih primerih celo preseže vrednost, potrebno za nastanek prve poškodbe oz. ovalizacije luknje kompozitne lamele iz armirane plastike. Takšno obnašanje je posledica trganja ojačitvenih steklenih vlaken kompozitne plošče iz armirane plastike pred vijakom in v primeru večjih robnih oddaljenosti luknje je treba vsiliti večje pomike za pretrg vseh vlaken. Z uporabo takšnega spoja v praksi lahko računamo na dodatno nosilnost in varnost tudi po tem, ko so na plošči iz armirane plastike že vidne prve poškodbe. Takšen spoj izkazuje v končni fazi tudi določeno stopnjo duktilnosti. Glede na spoj P2 s srednjo robno oddaljenostjo luknje (zele na črtkana črta) opazimo, da obremenitev spoja po nastanku prve poškodbe pri povprečnem pomiku $u_1=1,5 \text{ mm}$ pade. Temu sledi ponoven dvig sile, ki je potreben za pretrg ojačitvenih vlaken v smeri pravokotno na potek glavnih ojačitvenih vlaken. Ko so pretrgana vsa vlakna v smeri pravokotno na potek glavnih ojačitvenih vlaken, pride do hipnega padca sile, ki se ustali pri 20 kN , kar je približno 30% prvotne nosilnosti. Poleg tega je porušni mehanizem PO4, ki poteka vzdolž sredine plošče iz armirane plastike (preglednica 1), po celotni dolžini

Oznaka preizkušanca	e [mm]	$F_{vijaka,1}$ [kN]	u_1 [mm]	$F_{vijaka,p}$ [kN]	u_p [mm]	Porušni mehanizem	
P1-1.5d-1	36	20,16	0,56	18,12	0,95	strižna porušitev	
P1-1.5d-2	36	17,52	0,65	18,52	1,17	strižna porušitev	
P1-1.5d-3	36	16,68	0,57	14,12	1,01	strižna porušitev	
P1-1.5d-4	36	23,44	0,81	Preizkus smo zaključili ob 1. večjem padcu sile			
P2_3.5d-1	86	61,60	1,09	57,16	2,84	cepilna porušitev	
P2_3.5d-2	86	66,40	1,38	31,76	2,59	cepilna porušitev	
P2_3.5d-3	86	60,80	1,15	55,08	4,75	strižna porušitev	
P2_3.5d-4	86	56,48	1,25	Preizkus smo zaključili ob 1. večjem padcu sile			
P3_7.0d-1	168	63,68	1,38	87,92	6,52	strižna porušitev	
P3_7.0d-2	168	61,16	1,45	76,12	12,55	strižna porušitev	
P3_7.0d-3	168	54,84	1,24	82,88	13,47	strižna porušitev	
P3_7.0d-4	168	80,16	1,65	Preizkus smo zaključili ob 1. večjem padcu sile			

Preglednica 3. Obremenitev spojev P1, P2 in P3 pri nastanku prvih poškodb in porušitve s pripadajočimi pomiki in končnimi porušnimi oblikami.



Slika 7. Diagram obremenitve spoja v odvisnosti od povprečnega pomika vijaka v lameli iz armirane plastike za serijo preizkušancev P1, P2 in P3 do porušitve materiala.

od luknje do roba plošče iz armirane plastike zelo neugoden. Takšen porušni mehanizem namreč predstavlja tveganje za hipno dokončno porušitev zaradi presežene natezne trdnosti vseh vlaken v smeri pravokotno na potek glavnih ojačitvenih vlaken $f_{t,90}$. Iz obravnavanih in prikazanih rezultatov lahko sklepamo, da je pri spojih za konstrukcijske namene, kjer si želimo ohranitev nosilnosti po nastanku prvih večjih poškodb in duktilno obnašanje, nujno treba uporabiti spoje z daljšimi robnimi oddaljenostmi središča lukenj ($e = 7d$) od zunanjega roba kompozitne plošče e . Spojni jekleni vijaki so po končanih nateznih preizkusih spojev v vseh primerih ostali nedeformirani.

Za primerjavo z eksperimentalnimi rezultati prikazujemo v preglednici 4 še izračunane vrednosti nosilnosti spojev (P1, P2, P3) po smernici nastajajočega področnega standarda Evrokod [Ascione, 2016] za porušne oblike PO1, PO2 in PO3 ter dodatno še za porušno obliko PO4 po priročniku Fiberline design manual [Thorning, 2003], ki je v predlogu nastajajočega standarda Evrokod opuščena. Izračunane vrednosti nosilnosti spojev so določene kot vrednosti obremenitve, pri kateri pride do prvega večjega padca sile, kar je ekvivalentno eksperimentalno dobljenim silam $F_{vijaka,1}$ v preglednici 3. Hkrati v preglednici 4 prikazujemo še eksperimentalne povprečne vrednosti obremenitve spojev $F_{vijaka,1}$ kjer je prišlo do prvega večjega padca sile. Za izračun nosilnosti spojev pri posameznih porušnih oblikah smo uporabili enačbe, navedene v preglednici 1. Izkaže se, da vsi izrazi za večino primerov dajejo zelo konservativne rezultate. Za porušno obliko PO1 dobimo vrednost nosilnosti neto prereza 34 kN, kar je bistveno manj od dejanske natezne nosilnosti neto prereza lamele iz armirane plastike. Razlog za večje odstopanje se skriva v privzeti vrednosti faktorja koncentracije napetosti $k_{tc} = 3,75$, ki bi ga bilo treba posebej določiti za bolj realističen opis nosilnosti spoja po neto prerezu. Z izrazi za izračun nosilnosti spoja v primeru porušne oblike PO2 (ovalizacije luknje) dobimo vrednost za nosilnost 20,6 kN, s čimer se zelo približamo povprečni eksperimentalni vrednosti $F_{vijaka,1} = 19,5$ kN za

so računsko dobljene vrednosti nosilnosti zopet zelo konservativne in znašajo približno tretjino eksperimentalno določene nosilnosti $F_{vijaka,1}$. Pri preostalih dveh variantah spojev P2 in P3 je očitno, da smo najmanjšo računsko nosilnost dosegli pri porušni obliki PO2, ko je presežena nosilnost na bočni pritisk vijaka. Takšna porušna oblika je bila ob prvem večjem padcu sile za obe varianti spojev zaznana tudi pri eksperimentalni analizi. Faza, ko spoja P2 in P3 popolnoma odpove, sledi kasneje pri nadaljevanju obremenjevanja, s čimer se luknja še bolj ovalizira, porušna oblika pa preide v končno strižno porušitev PO3. Računsko določena nosilnost v preglednici 4 za spoja P2 in P3 znaša približno eno tretjino eksperimentalno dobljene nosilnosti $F_{vijaka,1}$, kar zopet kaže na to, da izrazi, podani v obravnavanih smernicah, dajejo zelo konservativne rezultate. Iz kontrole porušne oblike PO4, kjer pride do preseženih nateznih napetosti na sredini obremenjenega roba lamele iz armirane plastike pred vijakom v smeri pravokotno na potek glavnih ojačitvenih vlaken in obremenjevanja, lahko sklepamo, da takšna porušna oblika ni dominantna. Kljub temu se nam je pri eksperimentalni analizi oblike PO4 pojavila pri preizkušancih P2 s srednjo robno razdaljo središča luknje e . Rezultati eksperimentalne analize so nam pokazali, da je bila najbolj zanesljiva in primerna varianta spoja P3 za uporabo v praksi, saj lahko s krajšo robno razdaljo središča luknje e pričakujemo tudi neugodno porušno cepilno obliko PO4, ki lahko povzroči hipno izgubo večjega dela nosilnosti in odpoved spoja. V izognitev zasnovi vijačnih spojev, kjer bi se izpostavili takšnemu tveganju, so v smernici predloga Evrokoda za projektiranje konstrukcij iz armirane plastike navedene tudi geometrijske omejitve za razporeditev lukenj na lameli iz armirane plastike v sorazmerju s premerom spojnega vijaka. Za robno razdaljo do središča luknje e je predpisano, da mora znašati vsaj štirikratnik premera spojnega vijaka. V našem primeru bi po tem pravilu morala znašati robna razdalja e vsaj 96 mm, s čimer bi pri projektiranju izločili varianti s krajšima robnima razdaljama e in bi se s tem izognili neugodnim porušnim oblikam spoja.

Porušna oblika	Izračunana nosilnost spoja, V_{sb} [kN]			Povprečna eksperimentalno določena nosilnost spoja, $F_{vijaka,1}$ [kN]		
	P1 (1,5d)	P2 (3,5)	P3 (7d)	P1	P2	P3
PO1	34	34	34	/	/	/
PO2	20,6	20,6	20,6	/	61,3	65
PO3	7,2	21,6	46,8	19,5	/	/
PO4	11,6	34,9	75,4	/	/	/

Preglednica 4. Izračunane nosilnosti V_{sb} spojev P1, P2 in P3 za porušne oblike PO1, PO2, PO3 po smernici nastajajočega standarda Evrokod [Ascione, 2016] in za PO4 po priročniku Fiberline design manual [Thorning, 2003] ter povprečne eksperimentalno določene nosilnosti $F_{vijaka,1}$

primer preizkušancev P1 z najmanjšo robno razdaljo središča luknje e . V tem primeru je treba izpostaviti, da se je pri eksperimentalni analizi preizkušancev P1 za kritično porušno obliko izkazala oblika PO3 s strižno porušitvijo lamele iz armirane plastike pred vijakom, ki nastopi sočasno s preseženim bočnim pritiskom PO2. Do te ugotovitve lahko pridemo tudi glede na preglednico 4, ki kaže, da smo najmanjšo računsko nosilnost spoja P1 dosegli z izrazi za porušno obliko PO3. Primerjava eksperimentalnih in računskih rezultatov za spoj P1 nam pokaže, da

5 ZAKLJUČEK

Z eksperimentalno analizo preklonnega vijačnega spoja iz ploščatih s steklenimi vlakni utrjenih polimernih elementov, spojenih z enim vijakom, smo preverili vpliv bočnega pritiska vijaka na ploščo iz armirane plastike za tri različne robne razdalje e luknje vijaka do zunanjega roba plošče. Robna oddaljenost središča vijaka e (1,5d, 3,5d in 7d) je bila določena glede na smernico nastajajočega standarda Evrokod za projektiranje

konstrukcijskih elementov iz armirane plastike »Prospect for new guidance in the design of FRP« [Ascione, 2016] in priročnika Fiberline design manual [Thorning, 2003]. Rezultati preiskav so pokazali, da je za duktilno obnašanje vijačnih spojev elementov iz armirane plastike z enim vijakom treba zagotoviti zadostno robno oddaljenost e središča luknje priključnega elementa iz armirane plastike. V našem primeru sta bila duktilno obnašanje in ugodna porušna oblika spoja dosežena le pri spojih z največjo robno razdaljo $e = 7d$. Spoji z najkrajšo robno razdaljo $e = 1,5d$ so se izkazali kot neprimerni za uporabo v konstrukcijske namene zaradi krhkega obnašanja brez rezerve nosilnosti po nastanku ovalizacije luknje. Preizkušanci s srednjo oddaljenostjo lukenj $e = 3,5d$ so sicer izkazali višje nosilnosti pri nastanku prve poškodbe, vendar jih zaradi porušne oblike odsvetujemo za uporabo v konstrukcijske namene. Treba je tudi poudariti, da je za zagotavljanje zadostne nosilnosti po pravilih priročnika Fiberline design manual [Thorning, 2003] obravnavanih preklopnih spojev z enim vijakom zadoščala že srednja robna razdalja $e = 3,5d$. Po novejši smernici za pripravo standarda Evrokod za projektiranje konstrukcij iz armirane plastike »Prospect for new guidance in the design of FRP« srednja robna razdalja $e = 3,5d$ ne zadošča več, saj je v smernici poleg računskih kontrol za porušne oblike predpisana še minimalna robna razdalja e , ki mora znašati vsaj štirikratnik premera spojnega vijaka. S to omejitvijo se po smernici za pripravo področnega standarda Evrokod izognemo porušnim oblikam PO4 in PO5 in jih posledično ni treba kontrolirati. Dodatno se je izkazalo, da izrazi za kontrolo nosilnosti v obravnavani smernici podajajo zelo konservativne rezultate za izračun nosilnosti in da bi se lahko optimizirali.

6 ZAHVALA

Prikazani rezultati testov so bili narejeni v okviru diplomske naloge Robija Ponjaviča [Ponjavič, 2016], ki je tudi preko svojega podjetja Diviar, d. o. o., financiral stroške materiala. Zahvala gre še podjetjem Fiberline Composites AG, ki je poravnalo stroške transporta materiala, Sika, d. o. o., za donacijo lepila, Waltech International, d. o. o., za razrez FRP-profilov z vodnim curkom, Kvader MT, d. o. o., za dobavo in laserski razrez pločevine, Leksmat int, d. o. o., za pripravo pločevine za jedkanje in Galma, d. o. o., za samo jedkanje pločevine. Avtorja se zahvaljujeva tudi Agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, ki financira naše raziskave v raziskovalnem programu P2-0185.

7 LITERATURA

ACMA, Guidelines and Recommended Practices for Fiber-Reinforced-Polymer (FRP) Architectural Products, American Composites Manufacturers Association, 2016.

ASCE, Design of Fiberglass Reinforced Plastic (FRP) Stacks (ASCE/SEI 52-10), American Society of Civil Engineers, 2010.

Ascione, L., Caron, J.-F., Godonou, P., IJselmuiden, K. van, Knippers, J., Mottram, T., Oppe, M., Gantriis Sorensen, M., Taby, J., Tromp, L., Prospect for new guidance in the design of FRP, EUR 27666 EN, Evropska komisija, DOI: 10.2788/22306, 2016.

BÜV, Tragende Kunststoffbauteile, Entwurf-Bemessung-Konstruktion, Springer Vieweg, Wiesbaden, DOI: 10.1007/978-3-8348-2284-0, 2014.

CD 368, Design of fibre reinforced polymer bridges and highway structures, Highway Structures & Bridges Design, 2020.

Clark, J. L., Structural design of Polymer Composites, EURO-COMP Design Code and Handbook, Sir William Halcrow and Partners Ltd., 1996.

CNR, CNR-DT 205/2007-Guide for the Design and Construction of Structures made of FRP Pultruded Elements, National research council of Italy, 2008.

CROW-CUR, Recommendation 96:2019 - Fibre-reinforced polymers in buildings and civil engineering structures, Dutch Recommendation, 2019.

DIBt, Medienliste 40 für Behälter, Auffangvorrichtungen und Rohre aus Kunststoff, Deutsches Institute für Bautechnik, 2019.

DIN, DIN EN 13121-3 - GRP tanks and vessels for use above ground - Part 3: Design and workmanship, German Institute for Standardization, 2016.

DNV, Composite Components DNV-OS-C501-offshore standard, Det Norske Veritas AS, 2016.

EN, EN 13706-3 - Reinforced plastic composites - Specifications for pultruded profiles - Part 3: Specific requirements, European Committee for Standardisation, 2002.

Fiberline, spletna stran podjetja Fiberline <https://fiberline.com/european-standard-en-13706>, Fiberline Composites A/S, datum vpogleda 27.12.2021, 2021.

GZS, spletna stran Gospodarske Zbornice Slovenije <https://kompozitivgradbenistvu.gzs.si/dogodek>, Gospodarska Zbornica Slovenije, datum vpogleda 17. 11. 2021, 2021.

Jarc Simonič, M., Gostič, S., Trans-Ind - industrializacija uporabe elementov iz s karbonskimi vlakni armiranih polimerov pri gradnji infrastrukturnih objektov, Zbornik 32. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 7.-8. oktober 2010, Lopatič, J., Markelj, V., Saje, F., Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, Ljubljana, 225-232, 2010.

Keller, T., Theodorou, N. A., Vassilopoulos, A., P., Castro, J., Effect of natural weathering on durability of pultruded glass fiber-reinforced bridge and building structures, Journal of Composites for Construction, 20(1), 1-9, DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000589, 2016.

Koren, D., Kropej, J. J., Sistem modularne gradnje z nosilnimi elementi iz kompozitov s steklenimi vlakni, Gradbeni vestnik 66(11), str. 279-291, 2017.

Pedelta, spletna stran podjetja Pedelta S. L. <https://www.pedelta.com/leida-gfrp-pedestrian-bridge-p-52-en>, Pedelta S. L., datum vpogleda 18. 11. 2021, 2021.

Ponjavič, R., Eksperimentalna analiza vijačenih spojev iz armirane plastike, diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2016.

Trans-IND, spletna stran ZRMK https://gi-zrmk.si/novice/9/vabilo_na_delavnico, Zavod za raziskavo materiala in konstrukcij, datum vpogleda 7.10.2021, 2021.

Siwowski, T., Rajchel, M., Structural performance of a hybrid FRP composite-lightweight concrete bridge girder, Composites Part B, DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107055, 2019.

Smiths, J., Fiber-Reinforced Polymer Bridge Design in the Netherlands: Architectural Challenges toward Innovative, Sustainable and Durable Bridges, Engineering, DOI: 10.1016/J.ENG.2016.04.004, 2016.

STRUCTURAE, spletna stran portala Structurae <https://structurae.net/en/structures/leida-footbridge>, Structurae, International Database and Gallery of Structures, datum vpogleda 18. 11. 2021, 2021.

Thorning, H., The Fiberline Design Manual, Fiberline Composites A/S, 2003.

Žarnić, R., Osnovne lastnosti polimernih kompozitov, Gradbeni vestnik 51(6), 155-166, 2002.