

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Ponjavić, R., 2016. Eksperimentalna analiza vijačenih spojev iz armirane plastike. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Korelc, J., somentor Antolinc, D.): 65 str.

Datum arhiviranja: 06-09-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Ponjavić, R., 2016. Eksperimentalna analiza vijačenih spojev iz armirane plastike. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Korelc, J., co-supervisor Antolinc, D.): 65 pp.

Archiving Date: 06-09-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
KONSTRUKCIJSKA SMER**

Kandidat:

ROBI PONJAVIČ

**EKSPERIMENTALNA ANALIZA VIJAČENIH SPOJEV
IZ ARMIRANE PLASTIKE**

Diplomska naloga št.: 549/KS

**EXPERIMENTAL ANALYSIS OF BOLTED JOINTS
FROM FRP**

Graduation thesis No.: 549/KS

Mentor:

prof. dr. Jože Korelc

Somentor:

asist. dr. David Antolinc

Ljubljana, 01. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisani/-a študent/-ka **Robi Ponjavič**, vpisna številka **26103347**, avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: »**EKSPERIMENTALNA ANALIZA VIJAČENIH SPOJEV IZ ARMIRANE PLASTIKE**«.

IZJAVLJAM1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: Ljubljana

Datum: 29.08.2016

Podpis študenta/-ke:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.04(043.2)
Avtor:	Robi Ponjavič
Mentor:	prof. dr. Jože Korelec
Somentor:	asist. dr. David Antolinc
Naslov:	Eksperimentalna analiza vijačenih spojev iz armirane plastike
Tip dokumenta:	Diplomsko delo
Obseg in oprema:	65 str., 13 pregl., 59 sl.
Ključne besede:	Armirana plastika, karbonska vlakna, kevlar vlakna, steklena vlakna, vijačeni spoji.

Izvleček:

V diplomski nalogi sem obravnaval obnašanje natezno obremenjenih mehansko vijačenih spojev kompozitnih FRP elementov z enim vijakom. Za tri različne oddaljenosti središča luknje vijaka od obremenjenega roba v priključnih kompozitnih elementih sem izvedel eksperimentalno analizo z nateznim preizkusom spoja. S tem smo dobili primerjavo obnašanja različnih konfiguracij spoja, kjer spojni vijak pritiska na luknjo kompozitne plošče. Dodatno sem preverili tudi obstoječe enačbe za projektiranje obravnavanih spojev, katere so navedene v priročniku podjetja Fiberline. Na začetku diplome so najprej predstavljene z vlakni armirane plastike (FRP), njihova sestava, materialne lastnosti, proizvodni postopki za konstrukcijske namene, standardi in smernice za načrtovanje konstrukcijskih spojev ter vrste konstrukcijskih spojev. Temu sledi opis preizkušancev in zasnova nateznega preizkusa vijačenega spoja. Oddaljenost središča luknje vijaka s premerom d od obremenjenega roba priključnih kompozitnih elementov je za prvo serijo preizkušancev znašala $1,5*d$, za drugo serijo $3,5*d$ in za tretjo serijo $7*d$. V vsaki seriji sem obravnaval po 4 preizkušance. Med vsako preiskavo sem merili silo in relativni pomik spojnega vijaka glede na kompozitno ploščo v katero se je vijak vtiskal. Zaradi bočnega pritiska vijaka je prišlo do različnih tipov porušnih mehanizmov kompozitnih plošč v odvisnosti od oddaljenosti luknje od obremenjenega roba plošče. Izkaže se, da sem dobil najbolj neugodno obliko porušitve in pri najnižji doseženi sili dobili pri preizkušancu z najmanjšo oddaljenostjo luknje od obremenjenega roba. Po nastanku prve poškodbe spoj skoraj popolnoma izgubi nosilnost in ne izkazuje nobene dodatne rezerve, pride do krhke porušitve. Pri preostalih dveh preizkušancih z večjo razdaljo se spoja obnašata duktilno in z rezervo v nosilnosti po nastanku prvih poškodb. S tem izkažeta tudi primernost za uporabo v konstrukcijske namene, medtem ko spoj z najkrajšo razdaljo predstavlja preveliko tveganje za takšno uporabo. Dodatno, sem tudi potrdil odvisnost porušne oblike od razdalje središča luknje vijaka do obremenjenega roba kompozita, katera je navedena v priročniku podjetja Fiberline za projektiranje konstrukcije iz kompozitnih materialov.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.04(043.2)
Author: Robi Ponjavić
Supervisor: prof. Jože Korelc, Ph.D.
Co-Supervisor: assist. David Antolinc, Ph.D.
Title: Experimental analysis of bolted joints from FRP
Scope and tools: 65 p., 13 tab., 59 fig.
Keywords: FRP-Fiber Reinforced Polymers, carbon fibres, kevlar fibres, glass fibres, bolted joints.

Abstract:

This thesis presents the behaviour of FRP composite bolted connections with one steel bolt exposed to tension load. The experimental analysis of three different configuration of bolted connection with one bolt has been conducted with the tension test. The distance between the center of the hole and the loaded edge of the composite plate is the only changing parameter, where the rest are all constant. Additionally, we checked the current equations, which are in use by the company Fiberline to design one bolt FRP connections. The introduction of the thesis discusses the basic of the FRP materials with their composition, mechanical characteristics, production methods together with standards and guidelines for design of structural elements and connections made of FRP materials. This is followed by the detailed description of the specimen and the test setup itself. The distance between the loaded FRP plate edge and the center of the bolt hole with the diameter of d is for the first series of specimens $1.5*d$, for the second is $3.5*d$ and for the last one is $7*d$. Each series contained 4 specimens. During the experiment conduction the force and the relative displacement of the steel bolt have been recorded.

Due to the bearing stress of the bolt the specimens have experienced different failure mechanisms in relationship to the distance between the center of the bolt hole and the loaded edge of the composite plate. As expected, the worst behaviour of the tested connections has shown the connection with the shortest distance ($1.5*d$). This type of connections has no post fracture load bearing capacity after the first recorded damage and represents brittle failure. For the other two configurations of specimens with longer distance between center of the bolt hole and the loaded edge of the FRP plate we observed ductile behaviour and good post fracture behaviour. This shows that we must ensure the minimum adequate distance between center of the bolt hole and loaded FRP plate edge whenever we use this type of connections for structural purposes. We additionally confirmed the failure mechanisms in relationship to the distance between the center of the bolt hole and the loaded FRP plate edge which are stated in the internal design manual of the company Fiberline.

ZAHVALA

Za pomoč in podporo pri nastajanju diplomskega dela se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Jožetu Korelcu in somentorju asist. dr. Davidu Antolincu. Hvala tudi doc. dr. Primožu Možetu za začetno pomoč in vsem prijateljem, ki so me spodbujali pri zaključku študija.

Než, Pepi in Feliks najlepša hvala za brezkompromisno in optimistično podporo, ob izdelavi diplomske naloge.

Ati in mami vam pa najlepša hvala za brezkompromisno in optimistično podporo, ne le ob izdelavi diplomske naloge, temveč za obdobje celotnega študija.

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD	1
2 Z VLAKNI ARMIRANE PLASTIKE	2
2.1 Splošno o kompozitih iz armiranih plastik	2
2.2 Sestavni deli armiranih plastik	4
2.2.1 Armatura (ojačitvena vlakna)	4
2.2.1.1 Lastnosti vlaken	5
2.2.1.2 Razpoložljive oblike vlaken za armiranje	7
2.2.2 Matrica (smola)	8
2.2.2.1 Polimerne matrice	9
2.2.3 Polnila	10
2.2.4 Aditiv (Dodatki)	10
2.2.5 Vezava (spajanje) vlaken in matrice	11
2.2.6 Relacija napetost-deformacija ob natezni sili vzdolž vlaken	12
3 PROIZVODNE METODE ARMIRANE PLASTIKE ZA KONSTRUKCIJSKE NAMENE	13
3.1 Proizvodne metode	13
3.2 Najbolj primerna metoda za proizvodnjo armiranih plastik za konstrukcijske namene	14
3.3 Pultruzija – Vlečna metoda proizvodnje	14
4 STANDARDI IN SMERNICE ZA NAČRTOVANJE SPOJEV	17
4.1 Standardi	17
4.2 Smernice	18
5 KONSTRUKCIJSKI SPOJI	20
5.1 Splošne informacije	20
5.2 Lepljeni spoji	20

5.3	Mehanski vijačeni spoji	22
5.4	Kombinirani spoji	23
5.5	Primerjava lepljenega, mehanskega in kombiniranega spoja	24
6	LABORATORIJSKI PREIZKUS	27
6.1	Namen preizkusov	27
6.2	Materialne lastnosti armirane plastike	27
6.3	Analitične formule za izračun bočnega pritiska vijaka v vzdolžni smeri (0°)	29
6.4	Primer izračuna natezno obremenjenega vijačenega spoja, smeri 0° (vzdolž vlaken)	33
6.5	Priprava in izračun dimenzij preizkušancev	35
6.6	Zasnova in opis preizkušanca	36
6.5.1	Kontrola dolžine lepljenja profila iz armirane plastike v toge jeklene vilice	36
6.5.2	Kontrola nosilnosti oslabiljenega prereza	37
6.5.3	Kontrola strižne nosilnosti vijaka	38
6.5.4	Kontrola nosilnosti vijaka na bočni pritisk	38
6.5.5	Dimenzije preizkušancev	40
6.7	Vpetje preizkušanca v hidravlično napravo Instron in namestitev induktivnih merilcev	41
6.8	Oprema in zajem podatkov	42
6.9	Potek raziskave	43
7	REZULTATI PREIZKUSA	46
7.1	Rezultati posameznih preizkusov serije P1	46
7.2	Rezultati posameznih preizkusov serije P2	50
7.3	Rezultati posameznih preizkusov serije P3	54
7.4	Diagram sila-pomik pri 1. poškodbi materiala spojev P1, P2, P3	58
7.5	Nosilnost spojev	59
8	ZAKLJUČEK	62
	VIRI	64

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: <i>Mehanske lastnosti E-steklenih, karbonskih, in aramidnih vlaken (standardne vrednosti) [5].</i>	6
Preglednica 2.2: <i>Kvantitativna ocena različnih vrst vlaken: 3=zelo dobro, 2=dobro, 1=zadostno, 0=nezadostno [4].</i>	6
Preglednica 2.3: <i>Lastnosti UP in EP matric (smol) [4].</i>	9
Preglednica 4.1: <i>Minimalne vrednosti materialnih lastnosti pultruzijskih konstrukcijskih profilov E17 in E23 [9].</i>	18
Preglednica 5.1: <i>Tipične značilnosti mehanskih vijačenih spojev iz armirane plastike [12].</i>	24
Preglednica 5.2: <i>Tipične značilnosti lepljenih spojev iz armirane plastike [12].</i>	24
Preglednica 5.3: <i>Tipične značilnosti kombiniranih spojev iz armirane plastike [12].</i>	25
Preglednica 5.4: <i>Lastnosti različnih vrst spojev [12].</i>	26
Preglednica 6.1: <i>Vrednosti za različne trdnosti v suhih pogojih za material kakovosti E17 [2], [9].</i>	27
Preglednica 6.2: <i>Vrednosti za različne togosti v suhih pogojih za material kakovosti E17 [2], [9].</i>	28
Preglednica 6.3: <i>Nosilnost vijakov izpostavljenih strigu, preglednica povzeta po Fiberline priročniku [2].</i>	34
Preglednica 6.4: <i>Dimenzije preizkušancev.</i>	40
Preglednica 7.1: <i>Nosilnosti spojev s 1. poškodbami, poružitvami in pripadajočimi pomiki</i>	60

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Različni tipi vlaken v armirnih plastikah: <i>a</i> – dolga neprekinjena vlakna, <i>b</i> – kratka usmerjena vlakna, <i>c</i> – kratka naključno orientirana vlakna.	2
Slika 2.2: Shematični prikaz plastike armirane z vlakni: <i>a</i> –I profil iz armirane plastike, <i>b</i> –pečni izrez iz stojine I profila iz armirane plastike, <i>c</i> –izrez enega vlakna z matrico.	4
Slika 2.3: Specifična natezna trdnost normirana z gostoto materiala $[\sigma/\rho]$ in Youngov elastični modul normiran z gostoto materiala $[E/\rho]$: <i>HT</i> – visoka natezna trdnost, <i>HM</i> – visok elastični modul, ϵ_F – raztezek pri poružitvi [4].	5
Slika 2.4: Različne vrste prej: <i>a</i> -gladka ravna preja, <i>b</i> -delno prepletена preja, <i>c</i> -prepletена preja [2].	7
Slika 2.5: Primeri najbolj pogostih armaturnih tkanin [2].	8
Slika 2.6: Vpliv orientacije vlaken na elastični modul [4].	11
Slika 2.7: Razmerje napetost-deformacija za armirano plastiko in njene komponente [6].	12
Slika 3.1: Shematski prikaz proizvodnih metod primernih za gradbeništvo: <i>a</i> –ročno lameliranje, <i>b</i> –strojno lameliranje, <i>c</i> –navijanje vlaken, <i>d</i> –injektiranje v kalup [14].	13
Slika 3.2: Shematski prikaz pultruzijskega procesa [14].	15
Slika 3.3: Fiberlinov pultruzijski proizvodni obrat [9].	16
Slika 5.1: Prikaz različnih vrst lepljenih spojev [8], [9].	20
Slika 5.2: Prikaz različnih vrst mehanskih (vijačenih) spojev: <i>a</i> -spoj pod kotom 0° , <i>b</i> -spoj pod kotom 35° , <i>c</i> -spoj pod kotom 90° , <i>d</i> -spoj pod kotom 135° [9].	22
Slika 5.3: Prikaz različnih vrst porušnih mehanizmov mehanskih vijačenih spojev [2].	23
Slika 5.4: Prikaz izvedbe kombiniranega spoja: <i>a</i> –vrtanje lukenj za vijake, <i>b</i> –brušenje zaščitnega sloja in čiščenje lepljene površine, <i>c</i> –nanašanje lepila z grabljicami, <i>d</i> –zategovanje vijakov mehanskega stika [2].	23
Slika 6.1: Glavne smeri trdnosti in togosti.	28
Slika 6.2: Porazdelitev napetosti v laminatu okoli vijaka.	30
Slika 6.3: Strižna porušitev prečno na vlakna, poleg vijaka (porušitev po neto prerezu) [2].	31
Slika 6.4: Cepilna porušitev pred vijakom v vzdolžni smeri [2].	31
Slika 6.5: Strižna porušitev pred vijakom v vzdolžni smeri (strig) [2].	32
Slika 6.6: Strižna porušitev diagonalno na vlakna pred vijakom vzdolžni smeri [2].	32
Slika 6.7: Tlačna porušitev pred vijakom (ovalizacija) [2].	33
Slika 6.8: Primer vijačenega spoja [2].	33
Slika 6.9: Dimenzije pravokotnih profilov iz armirane plastike.	35
Slika 6.10: Zasnova preizkušanca: <i>a</i> -vijak s kratkim navojem, matico in podložk, <i>b</i> -toge jeklene vilice z ojačitvijo, <i>c</i> -epoksi lepilo »Sikadur 330«, <i>d</i> -preizkušanec iz armirane	

<i>plastike, e- toge jeklene vilice z ojačitvijo, f-sestavljen preizkušanelec pripravljen za vpetje.</i>	36
Slika 6.11: <i>Skica lepljenja armirane plastike v toge jeklene vilice.</i>	37
Slika 6.12: <i>Skica obremenitve toge jeklene vilice.</i>	37
Slika 6.13: <i>Skica obremenitve toge jeklene vilice in prikaz odmikov e_1 in e_2.</i>	39
Slika 6.14: <i>Skica geometrijskih oznak preizkušancev.</i>	40
Slika 6.15: <i>Skica vpetja preizkušanca in namestitve induktivnih merilcev pomikov (LVDT).</i>	41
Slika 6.16: <i>Instron naprave za potrebe izvedbe preizkusa.</i>	42
Slika 6.17: <i>Prikaz namestitve induktivnih merilnih naprav na preizkušanelec P1_1.5d-2: a– induktivni merilec LVDT2, b–induktivni merilec LVDT1 levo in LVDT2 desno sliki.</i>	43
Slika 6.18: <i>Pripravljalna dela: a-vektorski izris v AutoCAD-u, b-laserski rezalni stroj, c-rezalnik z vodnim curkom, d-oksidirana pločevina, e-kadi za jedkanje, f-grobo obrušen laminat, g-lepilo Sikadur 330, h-izris mreže na preizkušancu.</i>	44
Slika 6.19: <i>Serijske preizkušancev: a-serija P1, b-serija P2, c-serija P3.</i>	45
Slika 7.1: <i>Diagram pomika in sile za preizkušanelec P1_1.5d-1.</i>	46
Slika 7.2: <i>Deformiran preizkušanelec P1_1.5d-1. Strižna porušitev.</i>	46
Slika 7.3: <i>Diagram pomika in sile za preizkušanelec P1_1.5d-2.</i>	47
Slika 7.4: <i>Deformiran preizkušanelec P1_1.5d-2. Strižna porušitev.</i>	47
Slika 7.5: <i>Diagram pomika in sile za preizkušanelec P1_1.5d-3.</i>	48
Slika 7.6: <i>Deformiran preizkušanelec P1_1.5d-3. Strižna porušitev.</i>	48
Slika 7.7: <i>Diagram pomika in sile za preizkušanelec P1_1.5d-4.</i>	49
Slika 7.8: <i>Deformiran preizkušanelec P1_1.5d-4. Lokalna strižna porušitev.</i>	49
Slika 7.9: <i>Diagram pomika in sile za preizkušanelec P2_3.5d-1.</i>	50
Slika 7.10: <i>Deformiran preizkušanelec P2_3.5d-1. Cepilna porušitev.</i>	50
Slika 7.11: <i>Diagram pomika in sile za preizkušanelec P2_3.5d-2.</i>	51
Slika 7.12: <i>Deformiran preizkušanelec P2_3.5d-2. Cepilna porušitev.</i>	51
Slika 7.13: <i>Diagram pomika in sile za preizkušanelec P2_3.5d-3.</i>	52
Slika 7.14: <i>Deformiran preizkušanelec P2_3.5d-3. Strižna porušitev.</i>	52
Slika 7.15: <i>Diagram pomika in sile za preizkušanelec P2_3.5d-4.</i>	53
Slika 7.16: <i>Deformiran preizkušanelec P2_3.5d-4. Lokalna strižna porušitev..</i>	53
Slika 7.17: <i>Diagram pomika in sile za preizkušanelec P3_7.0d-1.</i>	54
Slika 7.18: <i>Deformiran preizkušanelec P3_7.0-1. Strižna porušitev.</i>	54
Slika 7.19: <i>Diagram pomika in sile za preizkušanelec P3_7.0d-2.</i>	55
Slika 7.20: <i>Deformiran preizkušanelec P3_7.0d-2. Strižna porušitev.</i>	55
Slika 7.21: <i>Diagram pomika in sile za preizkušanelec P3_7.0d-3.</i>	56
Slika 7.22: <i>Deformiran preizkušanelec P3_7.0d-3. Strižna porušitev.</i>	56
Slika 7.23: <i>Diagram pomika in sile za preizkušanelec P3_7.0d-4</i>	57

Slika 7.24: <i>Deformiran preizkušanelec P3_7.0d-4. Lokalna strižna porušitev.</i>	57
Slika 7.25: <i>Diagram pomika in sile za serijo preizkušancev P1, P2, P3 – 1. poškodba.</i>	59
Slika 7.26: <i>Diagram pomika in sile za serijo preizkušancev P1, P2, P3 – porušitev materiala</i>	61

1 UVOD

Vijačeni spoji so najbolj pogosti pri spajanju konstrukcijskih elementov iz armirane plastike predvsem zaradi hitre izvedbe, ekonomičnosti in enostavnemu pregledu kvalitete samega spoja. V vijačenem spoju se obremenitve med elementi prenašajo preko stebela vijaka in preklopnih kompozitnih plošč. Spoji zagotavljajo prenos nateznih in tlačnih obremenitev. Steblo vijaka in kompozitna plošča imata v spoju majhno kontaktno površino zato pri natezni obremenitvi nastanejo veliki bočni pritiski, ki v kompozitni plošči povzročijo velike koncentracije napetosti.

Namen diplomske naloge je izvesti eksperimentalno analizo vijačenih spojev iz armirane plastike. Pri preizkusu opazovati bočni pritisk vijaka na armirano plastiko in določiti mejno nosilnost spoja in način njegove porušitve.

Cilji naloge so:

- zbrati nekaj splošnih informacij o sestavi materiala in njegovih materialnih lastnostih,
- raziskati primerne proizvodne metode za potrebe konstrukcijskih profilov v gradbeništvo in izbrati najbolj primereno,
- pregled standardov in smernic za načrtovanje gradbenih konstrukcij, ki obstajajo,
- predstavitev vrst konstrukcijskih spojev, ki se uporabljajo in njihove prednosti in slabosti,
- pridobiti pravokotne profile iz armirane plastike (Fiberline Composites AG),
- pripraviti preizkušance, za izvedbo laboratorijskega preizkusa bočnega pritiska vijaka na armirano plastiko,
- izvesti laboratorijski preizkus,
- analizirati rezultate preizkusa in
- podati zaključek.

Motiv naloge je spoznavanje novega materiala, njegovih lastnosti in načina uporabe v konstrukcijskih spojih gradbenih konstrukcij.

2 Z VLAKNI ARMIRANE PLASTIKE

2.1 Splošno o kompozitih iz armiranih plastik

Beseda **kompoziten** -tna -o prid. (i) knjiž. *sestavljen, zložen* nakazuje, da je nekaj sestavljeno ali zloženo iz več elementov.

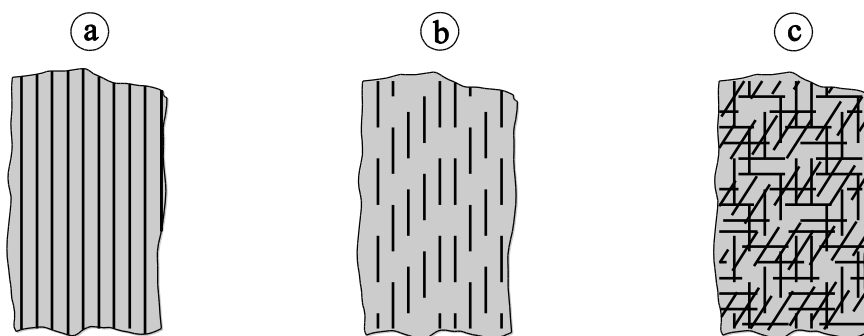
Kompoziti so tako definirani kot material, kateri vsebuje dve ali več različnih komponent materiala z različnimi lastnostmi in nobeden od njiju samostojno ni primeren za konstrukcijske namene. V kombinaciji enega z drugim rezultirata v lahek in zelo nosilen material s poljubnimi kemijskimi (korozijska odpornost, UV odpornost), mehanskimi (trdnost, trdota, elastični modul) in fizikalnimi (barva, gostota, prosojnost) lastnostmi.

Kompoziti so znani in v uporabi v gradbeništvu že več tisoč let, primer: slama mešana z glino uporabljena za gradnjo kolib v kameni dobi, beton armiran z jeklom pa kot primer iz modernih časov. V tej kombinaciji je armiran beton tisti, ki prevzame tlačne obremenitve, medtem ko natezne obremenitve prevzame jeklo.

V plastičnih materialih armiranih z vlakni je namen vlaken, da prevzamejo tlačne in natezne obremenitve, medtem ko matrica (smola, plastika) prenese strižne in tlačne obremenitve.

Plastika armirana z različnimi vrstami vlaken prispeva pomemben delež kompozitov, ki so uporabljeni v moderni družbi. Plastika armirana z vlakni je na grobo razdeljena v dve skupini:

- sintetični materiali armirani z dolgimi neprekinjenimi vlakni: Kompoziti, ki so armirani z dolgimi oziroma kontinuiranimi vlakni (Slika 2.1 a) se pogosto uporabljajo v velikih konstrukcijah kot so ladje, rezervoarji in krila vetrnih turbin, konstrukcijski profili.
- sintetični materiali armirani z kratkimi vlakni: Kompoziti, ki so armirani s kratkimi vlakni (Slika 2.1 b in c) se uporabljajo predvsem za brizgane in ekstrudirane plastične produkte.



Slika 2.1: Različni tipi vlaken v armiranih plastikah: a – dolga neprekinjena vlakna, b – kratka usmerjena vlakna, c – kratka naključno orientirana vlakna.

Ko v konstrukcijske namene uporabljamo kompozitne materiale iz armirane plastike (kompozit) namesto tradicionalnih materialov kot na primer jeklo, les ali beton pride običajno do pomembnega zmanjšanja teže, predvsem zaradi nižje lastne teže posameznih komponent. Kompozit iz armirane plastike je lahko kombinacija različnih matric (smol) in različnih vlaken, ki skupaj tvorijo nek produkt. Sestavljen in projektiran je lahko glede na specifično željeno obtežbo. Material je kemično odporen, korozijsko odporen ima majhno toplotno prevodnost in ni električno prevoden.

Plastika armirna z vlakni (FRP-Fibre Reinforced Polymer) je kompozitni material, ki se je v zadnjih 30 letih razvil do te mere, da je konstrukcijsko in ekonomsko sprejemljiv material in z njim lahko gradimo objekte in mostove. Rast v uporabi kompozitov v gradbeništvu si lahko razlagamo kot produkt boljšega in obširnejšega znanja o lastnostih komponent kompozita in njegove dolge življenjske dobe. To je omogočilo bolj specifično uporabo materiala in s tem se je nekoliko reduciralo vrednosti varnostnih faktorjev na neko realistično raven [2].

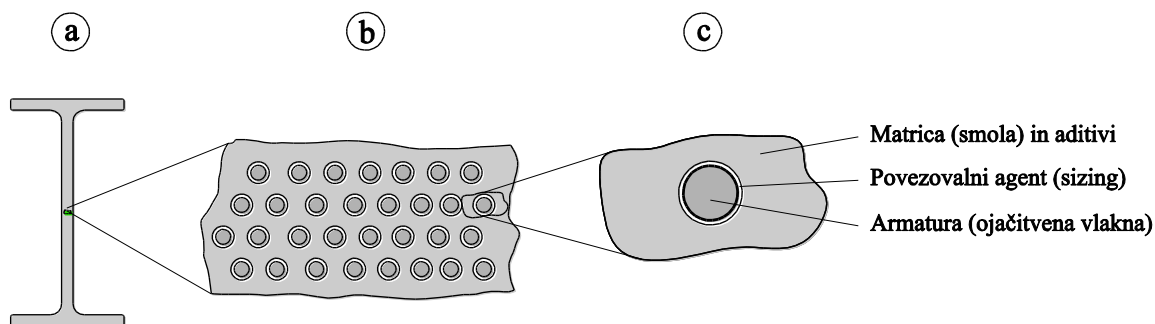
Kompozitni material uporabljen za potrebe gradbeništva ponavadi vsebuje različne vrste vlaken: steklena, aramidna ali karbonska vlakna. Vlakna so vgrajena v matrico (smolo), ki je po navadi iz epoksija, poliestra, vinilestra ali fenolne duroplastne smole, vsebnost vlaken v skupnem volumnu je od 35-75%. V gradbeništvu se uporabljajo kompoziti v različnih oblikah od konstrukcijskih profilov, armaturnih palic za beton, ojačitvenih trakov za zunanjo ojačitev betona in drugih posebno oblikovanih konstrukcijskih elementov. Odvisno od oblike in namena uporabe armirane plastike v gradbeništvu je material lahko dostavljen na gradbišče že kot proizveden produkt pripravljen za uporabo v konstrukciji na primer I, H profili ali armaturne palice za beton. Lahko je tudi dostavljen kot sestavni del kompozita v obliki suhih vlaken in tekoče polimerne smole ter je oblikovan in vulkaniziran v konstrukcijski element na sami lokaciji. Ti dve obliki lahko v gradbeništvu primerjamo z jeklenimi nosilci in prefabriciranimi betonskimi elementi, ki so pripravljene za takojšnje gradnje konstrukcije ali pa s primerom betona, ki je dostavljen na gradbišče v obliki cementa, agregata in vode in je tudi izveden direktno na sami lokaciji v konstrukcijski element [1].

2.2 Sestavni deli armiranih plastik

Armirana plastika je sestavljena (slika 2.2) iz matrice (smole) polimernega materiala, ki je armirana z vlakni ali z drugimi armirnimi materiali in združeni skupaj tvorijo material z izboljšanimi karakteristikami.

Osnovi sestavni deli so:

- **Armatura** (ojačitvena vlakna): Zagotavljajo ustrezne mehanske in temperaturne lastnosti in prevzemajo glavnino nateznih napetosti,
- **Matrica** (smola): Zagotavlja povezanost vlaken ter prenos obremenitve med vlakni preko strižnih napetosti. Skrbi tudi za mehansko zaščito vlaken in zaščito pred vplivi okolja,
- **Aditivi**: Izboljšujejo mehanske lastnosti, obdelovalnost, požarno varnost in kemijsko odpornost matrice,
- **Povezovalni agent** (sizing): zagotavlja dobro povezavo med vlakni in matrico. Vlakna se površinsko omoči. Nanese se sloj, ki zagotavlja ustrezno adhezijsko povezavo med matrico in vlakni. To je zelo pomembno, ker je to pogoj za ustrezen prenos obremenitev med vlakni in matrico, kemijsko odpornost, itd.. Ima tudi funkcijo zaščite vlaken med proizvodnjo,
- **Polnilo**: Dodaja se z namenom zmanjšanja stroškov in krčenja končnega izdelka ter zagotavljanje temperaturne stabilnosti.



Slika 2.2: Shematični prikaz plastike armirane z vlakni: a–I profil iz armirane plastike, b–pečni izrez iz stojine I profila iz armirane plastike, c–izrez enega vlakna z matrico.

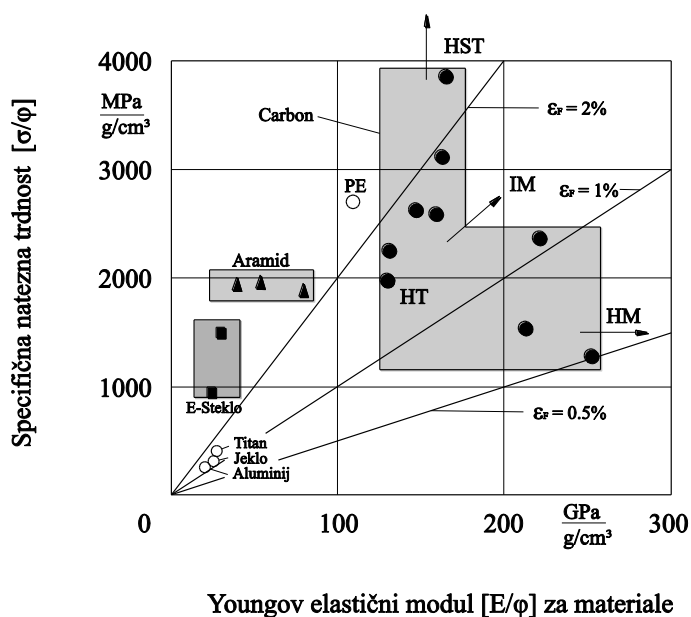
2.2.1 Armatura (ojačitvena vlakna)

Armatura v kompozitu služi predvsem zato, da se mehanskim materialnim lastnostim doda trdnost in togost na mestih, kjer so elementi natežno obremenjeni. V tlaku je problematičen lokalni uklon vlaken, ki ga mora preprečiti matrica. Takšna sestava je v naravi zelo pogosta pri rastlinah. Na primer les je lahek naravni kompozit, ki mu celulozna vlakna dajejo žilavost in trdnost. Umetni kompozit z vlakni je tudi armiran beton, v katerega se kot vlakna polaga jeklena armatura, ki prevzame natezne sile. V

betonskih konstrukcijah delež armature redko preseže 5%, pri armiranih polimerih pa je delež armature od 35-75% [3].

2.2.1.1 Lastnosti vlaken

Armirna plastika oz. kompozit je sestavljen iz nosilnih vlaken in matrice v katero so vlakna vstavljena. V današnjih kompozitih se uporabljajo predvsem steklena, aramidna (kevlar) in karbonska vlakna. Njihove mehanske lastnosti so povzete na sliki 2.3, kjer je prikazan Youngov elastični modul normiran z gostoto materiala v odvisnosti od specifične natezne trdnosti normirane z gostoto. Poudarjajo resnični potencial tega materiala v primerjavi z tradicionalnimi materiali. Če se vrednosti na ordinatni osi deli z faktorjem 10 na sliki 2.3 se dobi mejne dolžine materiala v km.



Slika 2.3: Specifična natezna trdnost normirana z gostoto materiala $[\sigma/\rho]$ in Youngov elastični modul normiran z gostoto materiala $[E/\rho]$: HT – visoka natezna trdnost, HM – visok elastični modul, ϵ_F – raztezek pri porušitvi [4].

V gradbeni industriji namesto precej dragih aramidnih in karbonskih vlaken uporabljajo dokaj poceni E-steklena vlakna. Pomanjkljivost steklenih vlaken je relativno nizek Youngov modul elastičnosti, nizka alkalna odpornost in nizka dolgotrajna trdnost zaradi napetostne korozije materiala. Mehanske lastnosti E-steklenih, karbonskih in aramidnih vlaken so prikazane v preglednici 2.1.

Preglednica 2.1: Mehanske lastnosti E-steklenih, karbonskih, in aramidnih vlaken (standardne vrednosti) [5].

Lastnosti	E-steklena vlakna	Karbonska vlakna	Aramidna vlakna	Enota
Natezna trdnost	3,500	2,600 - 3,600	2,800 - 3,600	MPa
Youngov modul E	73	200 - 400	80 - 190	GPa
Raztezek pri poružitvi	~ 4.5	0.6 – 1.5	2.0 – 4.0	%
Gostota	2.6	1.7 – 1.9	1.4	g/cm ³
Koeficient temp. raztezanja	5 ÷ 6	osno - 0,1 to -1.3, radialno 18	-3.5	10-6/K
Premer vlaken	3-13	6-7	12	μm ³
Struktura vlaken	izotropna	anizotropna	anizotropna	

V primeru karbonskih vlaken poznamo dve vrsti HT in HM vlakna. HT (high tensile) vlakna imajo visoko natezno trdnost in HM (high modul) vlakna imajo visok modul elastičnosti [4]. Pomanjkljivost karbonskih vlaken je v tem, da so neločljivo anizotropna (zmanjšana radialna trdnost), potrebujejo veliko energije za samo proizvodnjo in imajo relativno visoko ceno.

Aramidna vlakna (komercialno ime Kevlar ali Twaron) so sintetična vlakna. Tudi ta so na voljo v dveh oblikah, kot HT (high tensile) vlakna z visoko natezno trdnostjo in HM (high modules) vlakna z visokim elastičnim modulom. Pomanjkljivost aramidnih vlaken je majhna tlačna trdnost (500-1000 MPa), reducirana dolgotrajna trdnost zaradi napetostne korozije in občutljivost na UV sevanje.

V preglednici 2.2 imamo predstavljeno kvantitativno vrednotenje posameznih vlaken v laminatu. Preglednica ima ponderiran faktor, ki ima razpon vrednosti med 1-3 in je določen za vsako merilo materiala posebej. Ponderiran faktor se množi z ponderirano oceno vlaken in dobimo vrednostne točke za vsak tip vlaken. Vlakna z največjim seštevkom vrednostnih točk so najboljša.

Preglednica 2.2: Kvantitativna ocena različnih vrst vlaken: 3=zelo dobro, 2=dobro, 1=zadostno, 0=nezadostno [4].

Merilo	Ponderiran faktor	Ponderirana ocena vlaken:		
		Karbon	Aramid	E-steklo
Razpon ponderiranega faktorja	1 do 3	Karbon	Aramid	E-steklo
Natezna trdnost	3	9	9 (= 3x3)	9
Tlačna trdnost	2	6	0 (= 2x0)	4
Youngov modul [E]	3	9	6	3
Dolgotrajno obnašanje	3	9	6	3
Utrujanje	2	6	4	2
Nasipna gostota	2	4	6	2
Alkalna odpornost	2	6	4	0
Cena	3	6	6	9
Število točk		55	41	32

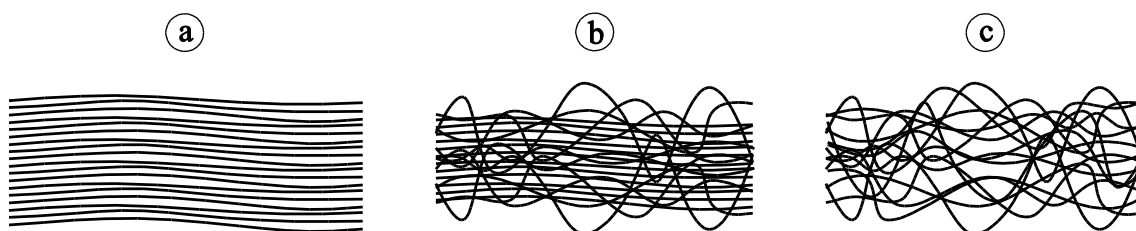
2.2.1.2 Razpoložljive oblike vlaken za armiranje

V osnovi sta na voljo dve obliki: preja kot enodimenzionalna armatura in tkanina tkana iz različnih prej kot večdimenzionalna armatura:

Preja kot enodimenzionalna armatura:

- Gladka ravna preja: Snop kontinuirnih vlaken razporejenih vzdolžno na prosti način.
- Delno prepletena preja: Snop kontinuirnih vlaken razporejenih vzdolžno; prepletenih v zanki, da mehansko lahko povezujejo sosednje preje.
- Prepletena preja: Snop vlaken razporejenih po dolžini in z zankami okoli snopa, da se zagotovi boljše sodelovanje sosednjih vlaken v enem snopu.
- Kratka vlakna: kratka vlakna, ki so narejena z razrezom gladke ravne preje.
- Mleta vlakna: zelo kratka vlakna pridobljena za mletjem in sejanjem kratkih vlaken.

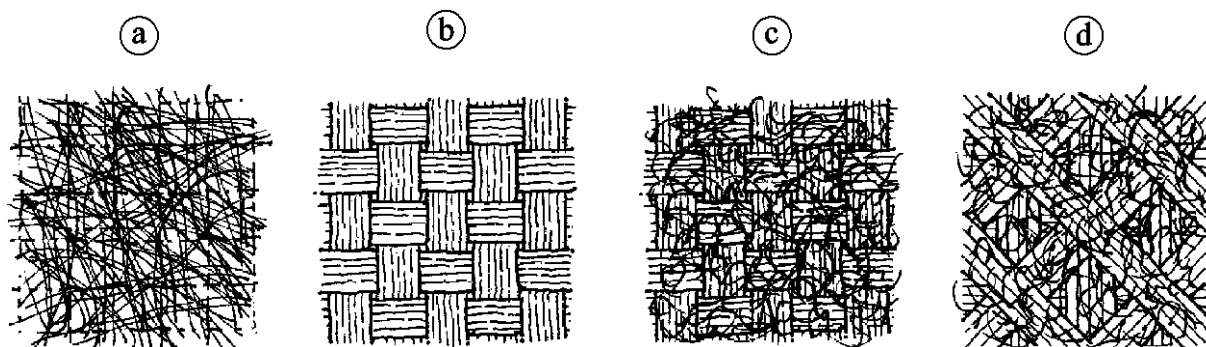
Na sliki 2.4 so predstavljene tri najbolj pogoste vrste prej, ki se uporabljajo v procesu izdelave konstrukcijskih profilov iz armirane plastike.



Slika 2.4: Različne vrste prej: a-gladka ravna preja, b-delno prepletena preja, c-prepletena preja [2].

Tkanina tkana iz različnih vrst prej kot večdimenzionalna armatura. Na sliki 2.5 so predstavljene štiri najbolj pogoste vrste tkanin, ki se uporabljajo v procesu izdelave konstrukcijskih profilov iz armirane plastike:

- Ravno tkanje s poljubno orientacijo vlaken (Slika 2.5 a),
- gladko ravno tkanje z orientacijo vlaken v smeri $0^\circ/90^\circ$ (Slika 2.5 b),
- ravno tkanje s poljubno orientacijo vlaken v kombinaciji z gladkim ravnim tkanjem v smeri $0^\circ/90^\circ$ (Slika 2.5 c),
- ravno tkanje s poljubno orientacijo vlaken v kombinaciji z gladkim ravnim tkanjem v smeri $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ (Slika 2.5 d).



Slika 2.5: Primeri najbolj pogostih armaturnih tkanin [2].

2.2.2 Matrica (smola)

Vloga matrice v kompozitu je, da veže armaturo skupaj in da drži armaturo na pravilnem mestu v sami geometriji profila z namenom optimalne izrabe mehanskih lastnosti. Matrica je sestavljena iz smol, polnil in aditivov. Danes je že večina polimernih materialov, ki jih uporablja človek sintetično pridobljenih. Primarna funkcija polimerne matrice je, da zagotavlja povezanost vlaken ter prenos obtežbe preko strižnih napetosti, hkrati pa tudi sama prevzema strižne napetosti. Matrica skrbi tudi za mehansko zaščito vlaken in zaščito pred vplivi okolja. Polimerne matrice pogosto imenujemo tudi plastika in se delijo v dve skupini termoplasti (plastomeri) in duroplasti (duromeri):

- **termoplasti** (plastomeri): pri povišani temperaturi so tekoči in se jih da oblikovati, ko pa se ohladijo, se viskoznost poveča in snov otrdi. To je tudi razlog, da so ti materiali občutljivi na viskozno lezenje zlasti pri povišanih temperaturah in imajo slabšo geometrijsko stabilnost in se jih v konstrukcijah, ki morajo izkazovati določeno trajnost in zanesljivost ne uporablja [7].
- **duroplasti** (duromeri): Duroplasti so manj občutljivi na viskozno tečenje pri dolgotrajni obtežbi in zmečkanje pri višjih temperaturah. Po potrebi se pred vgradnjo v polimerno maso dodajajo dodatki za doseg posebnih učinkov, kot so pigmenti, zaviralci gorenja, plastifikatorji za nižanje krhkosti matrice, dodatki za preprečevanje širjenja razpok,... S segrevanjem prek kritične temperature kemijske vezi razpadejo in recikliranje na način kot pri termoplastih ni mogoče. Nizka viskoznost med vgrajevanjem nam omogoča boljšo omočenost vlaken in boljšo sprijemnost z vlakni, boljšo geometrijsko stabilnost otrdele matrice, boljšo odpornost na kemikalije in druge negativne vplive okolja, so glavni razlogi, da se duroplasti pogosteje uporabljajo za matrice v kompozitnih materialih, ojačanih z vlakni. Matrica skrbi, da se vlakna v tlaku ne uklonijo, povezuje vlakna med seboj, da se lahko obtežba čim bolj enakomerno prerazporedi med vlakni [7].

Iz predhodnega opisa je razvidno, da imajo trenutno duroplasti večji potencial za konstrukcijsko rabo v gradbeništvu. Zato bomo v nadaljevanju govorili le o duroplastičnih maticah.

2.2.2.1 Polimerne matrice

Kjer vlakna izvajajo dejansko nosilnost ima polimerna matrica štiri funkcije:

- drži vlakna v željeni geometrijski obliki,
- prenaša obtežbo na vlakna,
- preprečuje izbočenje vlaken pri tlačni obremenitvi
- ščiti vlakna pred drugimi vplivi okolja (vlaga, kemikalije, UV svetloba...)

Za konstrukcije iz armirane plastike se v današnjem času uporabljajo predvsem duroplasti. Duroplasti se oblikujejo po strditvi ali polimerni reakciji nižje molekularnih oblik. Nasprotje termoplastov in duroplastov je, da se duroplasti po strditvi in ponovnem segrevanju ne morejo vrniti nazaj v prvotno plastično stanje in jih ni možno variti. Najbolj pomembni duroplasti v uporabi so iz nenasičenih poliestrskih smol (v nadaljevanju UP), epoksi smole (v nadaljevanju EP) in redko iz vinilesterske smole (v nadaljevanju VE). EP smole so lahko narejene kot polprodukt z delno vezavo tako imenovano preimpregnacijo, katera je lahko polno strjena v zadnji fazi proizvodnje. V splošnem imajo matrice viskozno elastično obnašanje razmerja napetost-deformacija. V preglednici 2.3 so povzete mehanske lastnosti najbolj uporabljenih smol med katere spadata UP in EP smola.

Preglednica 2.3: Lastnosti UP in EP matric (smol) [4].

Lastnosti	UP smole	EP smole	Enota
Natezna trdnost	20-70	60-80	MPa
Youngov modul E	2-3	2-4	GPa
Raztezek pri poružitvi	1-5	1-8	%
Gostota	1.2-1.3	1.2-1.3	g/cm ³
Temperaturna steklastega prehoda, Tg	70-120	100-270	°C

EP smole prikazujejo najboljše lastnosti ampak so zaradi tega tudi najdražje. VE smole so nekje vmes med EP in UP smole in niso pogosto v uporabi.

Vse vrste smole so v osnovi občutljive na UV sevanje, zato potrebujejo primerno zaščito s specialnimi aditivi premazi in površinskimi tkaninami.

2.2.3 Polnila

Funkcija polnila je zapolnitev geometrije profila, kjer ni potrebe po nosilnosti tako se zmanjša količina vgradnje drage armature in matrice. Omogočajo nam znižanje cene končnega proizvoda. S polnilom povečamo tudi temperaturno stabilnost matrice in odpornost na obrabo. Najbolj pogosta polnila so iz anorganskih in mineralnih materialov, kot so kalcijev karbonat, kaolinit in aluminijev oksid.

2.2.4 Aditiv (Dodatki)

Aditiv je splošen izraz za sredstva, ki so dodana v matrico. Odvisno od njihovega namena lahko aditive razdelimo v tri skupine:

- **Aditivi vezani na sam proces izdelave:** so snovi, ki imajo pozitiven učinek na proces izdelave in videz strjenega materiala. Primer: aditiv za nizke profile preprečuje krčenje med sušenjem. Aditiv preprečuje nastanek za las majhnih razpok na površini, hkrati povečuje odpornost na napetostno korozijo in izboljšuje odpornost materiala na utrujanje. Profilu zagotavlja tudi bolj natančne geometrijske tolerance in nižje notranje napetosti,
- **Aditivi vezani na funkcijo materiala:** imajo ugoden vpliv z uporabo končnega profila. Primer: dodajanje pigmenta za lepši končni izgled ali pa aditiv proti gorenju, kjer dobimo samougasljive lastnosti, ki preprečujejo širitev ognja. Lahko dodamo aditiv v tako velikih količinah, da zmanjšajo same mehanske lastnosti v profilu,
- **Aditiv za zmanjševanje cene:** funkcija dodatkov za zmanjšanje cene je, da nenosilni del geometrije profila zapolnimo z njim in ne uporabljamo matričnih in armaturnih materialov. Tako lahko zmanjšamo ceno končnega profila, vendar imajo profili zaradi zmanjšanja armature bistveno slabše mehanske lastnosti, odpornost proti napetostni koroziji in zmanjšano odpornost proti kemikalijam.

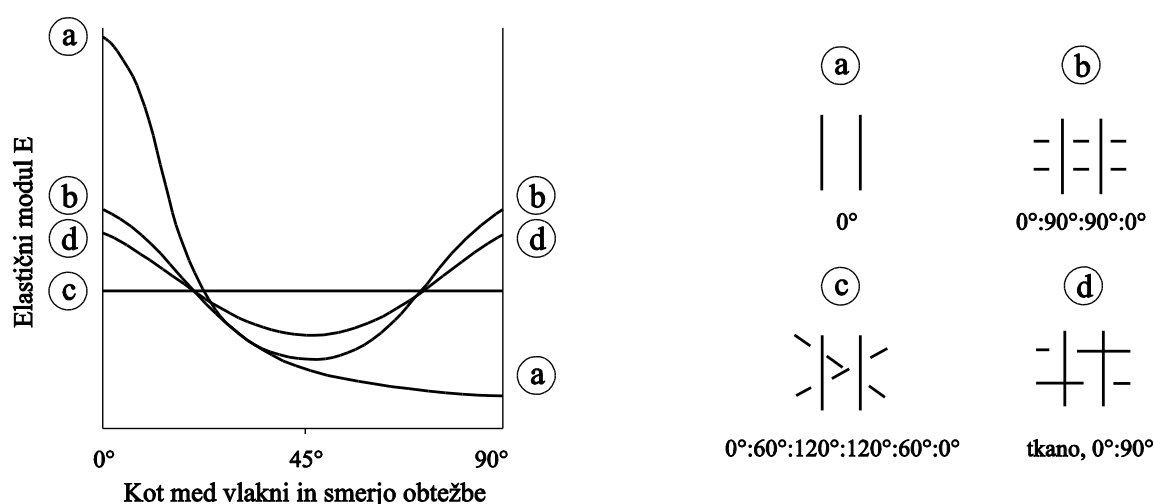
Medtem ko se namen in sestava armirane plastike lahko spreminja, bodo aditivi vedno vplivali na odpornost profilov proti napetostni koroziji, mehanske lastnosti in požarno odpornost.

2.2.5 Vezava (spajanje) vlaken in matrice

Mehanske lastnosti vezi vlaken in matrice v armiranih plastikah je v glavnem določena z adhezijo in mehansko združljivostjo med vlakni in matrico, pomemben je tudi kot med vlakni in smerjo obremenitve.

Za dobro mehansko interakcijo med vlakni in matrico moramo posamezne parametre prilagoditi drug drugemu. V armirani plastiki linearno-elastične deformacijske lastnosti določajo predvsem armaturna vlakna. Za preprečitev razvoja mikro razpok v matrici, preden armaturna vlakna dosežejo maksimalni raztezek je potrebno zagotoviti, da ima matrica večjo porušno deformacijo od vlaken. Kadar imamo tlačne obremenitve je potrebno imeti minimalno togost matrice tolikšno, da prepreči izbočenje vlaken.

Togost in trdnost vezi med vlakni in matrico je v veliki meri odvisna od kota med vlakni in smerjo obremenitve. Največje vrednosti obremenitve lahko dosežemo, kadar imamo konstantno smer obtežbe in v skladu s to smerjo obtežbe tudi razporeditev armaturnih vlaken. Kadar se smeri obtežbe spreminjajo je potrebno uporabljati večplastne strukture iz različnih tkanin (tkane tkanine in netkane tkanine z poljubno smerjo vlaken), ki imajo kvazi-izotropne lastnosti. V primerjavi z enosmernimi laminati se togost in trdnost večplastnih struktur iz različnih tkanin znatno zmanjša [4]. Na sliki 2.6 je prikazan vpliv orientacije vlaken na Youngov modul elastičnosti: a–enosno usmerjena vlakna, b–netkane tkanine, orientacija vlaken $0^\circ:90^\circ:90^\circ:0^\circ$, c–kvazi-izotropna netkana tkanina, orientacija vlaken $0^\circ:60^\circ:120^\circ:120^\circ:60^\circ:0^\circ$, tkana tkanina, orientacija vlaken $0^\circ:90^\circ$ [4].

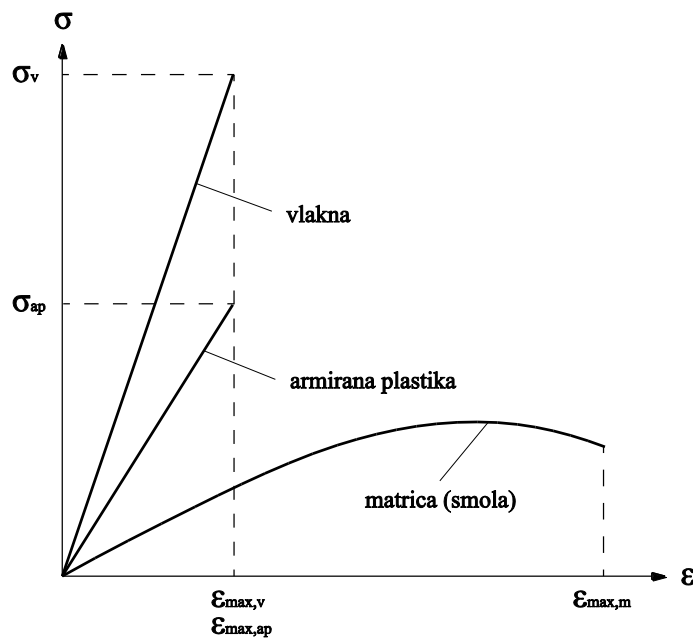


Slika 2.6: Vpliv orientacije vlaken na elastični modul [4].

2.2.6 Relacija napetost-deformacija ob natezni sili vzdolž vlaken

V nadaljevanju je poenostavljeno predstavljeno razmerje napetost-deformacija $\sigma(\epsilon)$ za enosmerno armirano plastiko in njene posamezne komponente ob nateznem preizkusu materiala v smeri vlaken. Slika 2.7 predpostavlja, da je maksimalna deformacija matrice veliko večja kot je maksimalna deformacija vlaken $\epsilon_{\max,m} > \epsilon_{\max,v}$. Ob tej predpostavki je funkcija $\sigma(\epsilon)$ blizu linearnosti v območju $(0, \epsilon_{\max,v})$ za vlakna, matrico in armirano plastiko.

Armirana plastika je krhek material in nima plastične deformacije kot jo ima jeklo. Maksimalna napetost je enaka napetosti ob porušitvi. Porušitev kompozita nastopi ob maksimalni napetosti in maksimalni deformaciji $\epsilon_{\max,m} > \epsilon_{\max,v}$ vlaken.



Slika 2.7: Razmerje napetost-deformacija za armirano plastiko in njene komponente [6].

3 PROIZVODNE METODE ARMIRANE PLASTIKE ZA KONSTRUKCIJSKE NAMENE

3.1 Proizvodne metode

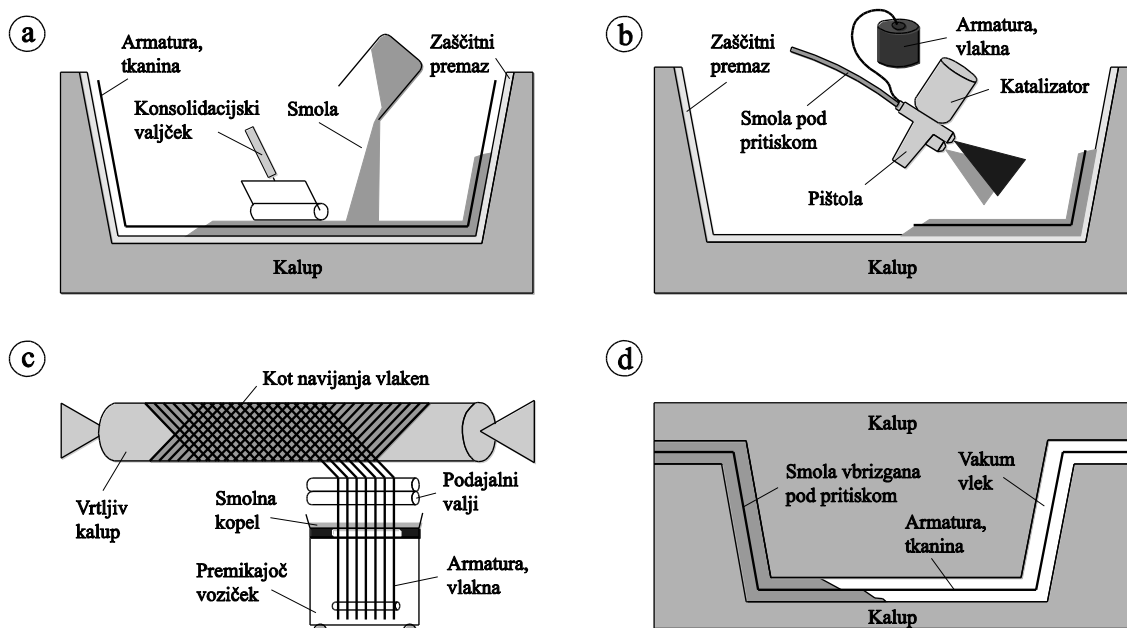
Z izjemo visokotehnoloških panog kot je vesoljska in aeronavtična se je proces izdelave kompozitnih materialov za področje gradbeništva razvil iz nizko tehnološkega procesa ročne proizvodnje v avtomatizirano proizvodnjo bolj naprednih gradbenih proizvodov. V začetni fazi, ko izbiramo proizvodno metodo izdelave armirane plastike moramo upoštevati koliko elementov bomo potrebovali, njihovo obliko in njihove dimenzije. V naslednji fazi so pomembne tudi zahteve za natezno trdnost, Youngov elastični modul poleg tega pa tudi natančnost izdelave in kvaliteta površine. Poznamo pet različnih proizvodnih metod, ki so primerne za proizvodnjo elementov v gradbeništvu:

1.) Ročna ali pol avtomatska proizvodnja:

- Ročno lameliranje (Slika 3.1 a »Hand lay-up«),
- strojno lameliranje (Slika 3.1 b »Spray-up«).

2.) Avtomatizirana proizvodnja:

- Navijanje vlaken (Slika 3.1 c »Filment winding«),
- injektiranje v kalup (Slika 3.1 d »Resin transfer moulding«),
- pultruzija - Vlečna metoda (Slika 3.2, »Pultrusion«).



Slika 3.1: Shematski prikaz proizvodnih metod primernih za gradbeništvo: a-ročno lameliranje, b-strojno lameliranje, c-navijanje vlaken, d-injektiranje v kalup [14].

3.2 Najbolj primerna metoda za proizvodnjo armiranih plastik za konstrukcijske namene

Najbolj primerna metoda za proizvodnjo armirane plastike v gradbeništvu je pultruzija – vlečna metoda. S to metodo lahko kontrolirano izvedemo kontinuiran konstantni prerez in obdržimo konstantne karakteristike materiala po celotnem prerezu.

Prednosti pred ostalimi proizvodnimi postopki:

- Hitra in ekonomična izdelava,
- nadzorovano dodajanje matrice (injektiranje),
- konstantne karakteristike materiala po celotnem prerezu,
- konstantna geometrija profila,
- mehanske lastnosti lahko kontroliramo,
- izvaja se v popolnoma zaprtem sistemu, ki omogoča minimalno izparevanje topil,
- hitra menjava šablone in matrice,
- reprodukcija profila z enakimi lastnostmi.

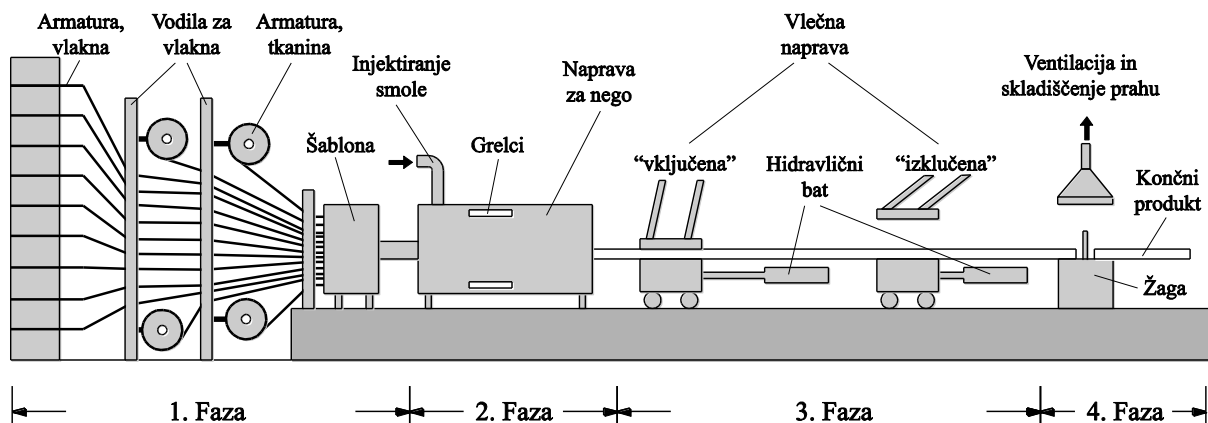
Pomanjkljivosti pred ostalimi proizvodnimi postopki:

- Prerez je lahko samo konstanten po celotni dolžini,
- proizvodna linija je draga.

3.3 Pultruzija – Vlečna metoda proizvodnje

Pultruzija je proces za kontinuirano proizvodnjo kompozitnih profilov s konstantnim prerezom in željnimi konstantnimi lastnostmi prereza za specifična področja uporabe proizvoda. Metoda zagotavlja stalno kakovost skozi celoten profil in omogoča tudi kasnejšo reprodukcijo z enakimi lastnostmi. Profil proizveden s procesom pultruzije vsebuje tri primarne komponente: armaturo, matrico in različne aditive.

V principu je proces izdelave enostaven in se uporablja v bolj enostavnih oblikah že od 50-ih let prejšnjega stoletja, moderen proces pultruzijske proizvodnje je prikazan na sliki 3.2.



Slika 3.2: Shematski prikaz pultruzijskega procesa [14].

Proces pultruzije poteka tako, da se v prvi fazi kontinuirano armaturo (neprekinjena vlakna, tkanina) navito na tuljavi vleče skozi šablono, ki skrbi za precizno razvrščanje po celotnem prerezu profila. Kombinacija, število, velikost in kompleksnost armature mora biti razporejena na način, da omogoča vizualno preverjanje razvrstitve vlaken in tkanine po celotnem prerezu.

V drugi fazi procesa se armatura vleče naprej skozi zaprto proizvodno opremo, kjer se armaturi dodaja smola (matrica) s postopkom injektiranja, postopek nam omogoča kontrolirano dodajanje smole in hkrati omogoča nadzor razvrstitve armature. Stopnja impregnacije vlaken je še en odločilen faktor, ki vpliva na mehanske lastnosti končnega proizvoda, injektivna metoda omogoča, najboljšo možno impregnacijo. Ko so vlakna impregnirana z matrico se material vleče naprej skozi ogrevano napravo, kjer se vrši segrevanje in negovanje materiala. V zadnjem delu te faze material dokončno zatrdi in dobi svoje končne mehanske in oblikovne lastnosti.

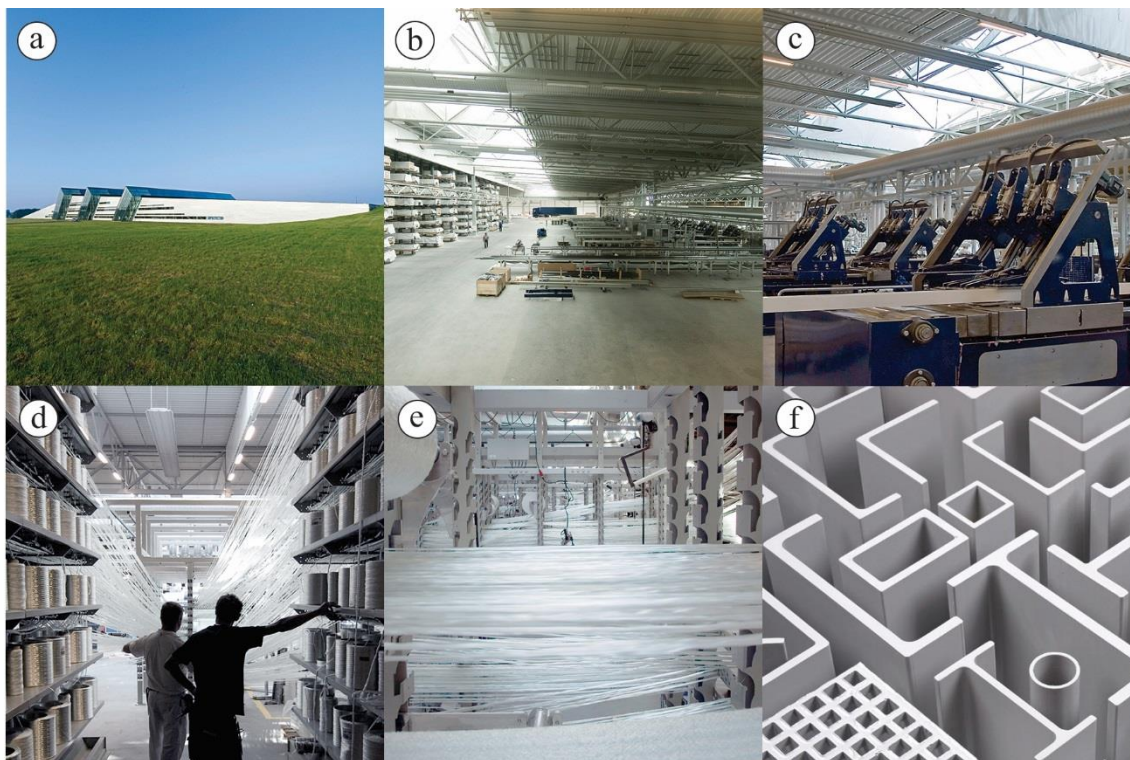
V tretji fazi procesa so naprave za vlečenje, ki so gonilna sila v celotnem procesu. Vlečenje se lahko izvaja z jermenji ali pa s postopkom povratnega vlečenja.

V četrti in zadnji fazi postopka je profil odrezan na končno dimenzijo s pomočjo pomične krožne žage. Žaga se premika z enako hitrostjo kot produkt. S tem je omogočen natančen pravokoten odrez profila na željeno dolžino in hkrati zagotavlja neprekinjen proces proizvodnje.

Enega najmodernejših pultruzijskih proizvodnih obratov za potrebe izdelave konstrukcijskih profilov iz armiranih plastik ima dansko podjetje Fiberline Composites AG.

Na sliki 3.3 a je prikazan Fiberlinov proizvodni obrat, ker so trije svetlobni stolpi in fasada narejeni iz armirane plastike, sliki 3.3 b je prikazana proizvodna linija in regali za skladiščenje, sliki 3.3 c so prikazane vlečne naprave, gonilna sila proizvodnje, sliki 3.3 d tuljave z navito armaturo, sliki 3.3 e je

prikazan del proizvodnje, kjer se vrši vizualno preverjanje razporeditve vlaken, sliki 3.3 f so prikazane geometrije konstrukcijskih profilov, ki jih proizvajajo.



Slika 3.3: Fiberlinov pultruzijski proizvodni obrat [9].

4 STANDARDI IN SMERNICE ZA NAČRTOVANJE SPOJEV

4.1 Standardi

V Evropi evrokod za armirane plastike še niso na voljo, edini obstoječ standard, ki se sklicuje na kompozite (z vlakni armirana plastika) je Evropski Standard EN 13706, ki govori o testiranju in obvestilih o GFRP (Glass Fibre Reinforced Polymers) pultruzijskih profilih. To velja samo za pultruzijske profile v konstrukcijske namene, ki so v skladu glede na standard definirani kot primeri »kjer je nosilna lastnost glavni kriterij oblikovanja in kjer je produkt sam del sistema nosilne konstrukcije« [9]. Standard določa minimalne zahteve za kakovost, tolerance, trdnost, togost in površino konstrukcijskih profilov in v osnovi deli pultruzijske konstrukcijske profile na dva razreda E23 in E17.

Standard je na splošno sestavljen iz treh delov:

- **EN 13706-1** vzpostavlja podatkovni sistem za označbo pultruzijskih profilov narejenih iz vlaken armiranih plastičnih kompozitov. Vrste pultruzijskih profilov se razlikujejo drug od drugega s klasifikacijo, ki temelji na podatkih o izboru materiala (tip uporabljene polimerne matrice, tip armaturnega materiala, tip armiranja) in dodatne značilnosti delovanja (npr. zaviralci gorenja, UV stabilnost, površinska obdelava) [19].
- **EN 13706-2** določa splošne zahteve za specifikacijo vseh vrst pultruzijskih profilov, ki spadajo v področje uporabe te specifikacije, kot je opredeljeno v standardu EN 13706-1. Namiguje na uporabo metod preizkušanja in odstopanja pultruzijskih konstrukcijskih profilov in daje smernice za kakovost in zagotavljanje kakovosti [20].
- **EN 13706-3** uvaja specifikacije pultruzijskih profilov. Specifikacija opredeljuje tiste lastnosti, ki morajo biti navedene in raven katero je potrebno doseči za vsak razred profila. Namiguje na minimalne vrednosti za tehnične lastnosti konstrukcijskih profilov v zvezi z standardom dveh razredov opisanih s kratko kodo, E23 – ima najbolj stroge zahteve za kakovost in E17 – milejše zahteve za kakovost (Efektivni modul elastičnosti izmerjen s preizkušanjem profila celotne dolžine) [21].

V preglednici 4.1 so predstavljene minimalne zahtevane mehanske lastnosti za pultruzijske armirane plastike po evropskem standardu EN 13706.

Preglednica 4.1: Minimalne vrednosti materialnih lastnosti pultruzijskih konstrukcijskih profilov E17 in E23 [9].

Lastnosti materiala	Minimalne zahteve		Enote	Metoda testiranja
	E17	E23		
Modul elastičnosti	17	23	GPa	Aneks D, EN 13706-2:2002
Natezni modul - vzporedno z vlakni, 0°	17	23	GPa	EN ISO 527-4
Natezni modul - prečno na vlakna, 90°	5	7	GPa	EN ISO 527-4
Natezna trdnost - vzporedno z vlakni, 0°	170	240	MPa	EN ISO 527-4
Natezna trdnost - prečno na vlakna, 90°	30	50	MPa	EN ISO 527-4
Trdnost na steblo vijaka, vzporedno z vlakni, 0°	90	150	MPa	Aneks E, EN 13706-2:2002
Trdnost na steblo vijaka, prečno na vlakna, 90°	50	70	MPa	Aneks E, EN 13706-2:2002
Upogibna trdnost, 0°	170	240	MPa	EN ISO 14125
Upogibna trdnost, 90°	70	100	MPa	EN ISO 14125
Strižna trdnost	15	25	MPa	EN ISO 14130

4.2 Smernice

Ni splošno sprejetih smernic za projektiranje konstrukcij za uporabo običajnih ali pultruzijskih po meri narejenih konstrukcijskih profilov iz armirane plastike. Po različnih virih ([1], [4], [2]) se je zelo malo spremenilo na tem področju v zadnjih letih. Obstajata dva splošna priročnika za dimenzioniranje za gradbene inženirje: Structural Plastic Design manual [12] in Eurocomp Design Code and Handbook [19]. Medtem, ko je dovolj dokazov za potrditev, da so analitične formule v teh dveh referenčnih priročnikih primerne za uporabo pri dimenzioniranju konstrukcij, pa ni soglasja o tem katere varnostne faktorje in odpornostne faktorje uporabljati. Nekateri proizvajalci zato ponujajo najbolj celovite hišne priročnike za dimenzioniranje konstrukcij. Primer priročnikov:

- Bedford Reinforced Plastics, Inc. Design Guide and Design Guide Appendix [15],
- The New and Improved PultexR Pultrusion Design Manual by Creative Pultrusions Inc.[16],
- EXTREN DWBR Design Guide by Strongwell [17],
- Fibreline Design Manual by Fibreline Composites A/S [9].

Vsi predhodno omenjeni priročniki za dimenzioniranje ponavadi vsebujejo:

- Splošne informacije o proizvodih, ki jih podjetje proizvaja,
- koncept dimenzioniranja,
- delni varnostni faktorji,
- dimenzijske parametre materiala,
- pravila za vijaačne spoje.

5 KONSTRUKCIJSKI SPOJI

5.1 Splošne informacije

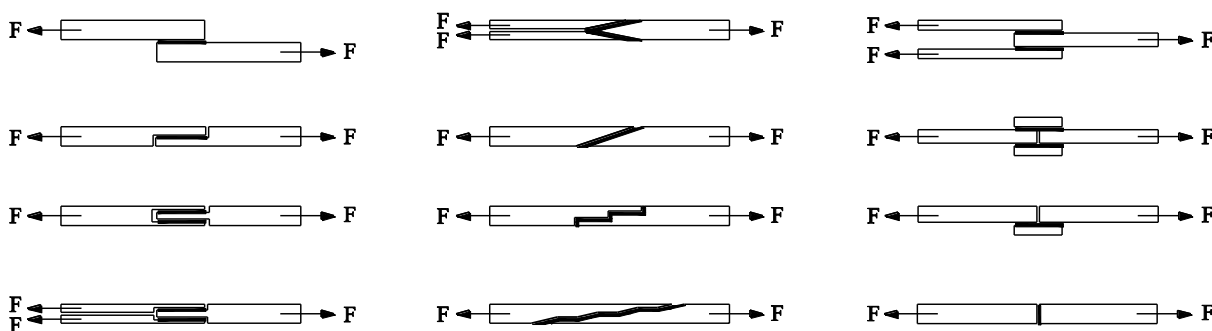
Konstruktorske profile iz armirane plastike je zelo težko mehansko spajati zaradi krhke vlaknaste in anizotropne lastnosti samega materiala. Uporaba primerne načina spajanja konstruktorskih elementov iz armirane plastike je ključnega pomena pri zagotavljanju konstruktorske stabilnosti. Pri izbiri same vrste stika moramo upoštevati različne lastnosti materiala: občutljivost na UV sevanje, vpliv kemikalij, temperature in tudi mehanske karakteristike materiala. Na splošno se izogibamo spajanju, če je le mogoče, kajti porušitve materiala se po navadi dogajajo v samem stiku zaradi koncentracije napetosti okoli samega stika [2], [8],[12].

Tri vrste povezav, ki se običajno uporabljajo v armiranih plastikah:

- lepljeni spoji (lepljeno),
- mehanski spoji (vijačen spoj) in
- kombinirani spoji (lepljen in vijačen spoj hkrati).

5.2 Lepljeni spoji

V lepljenem spoju sta dva profila spojena s pomočjo lepila. Najpogosteje uporabljena lepila so epoksi, akrilna in poliestrska. Izbira primerne lepila je odvisna glede na vrsto smole v matrici profila armirane plastike. Na splošno se obremenitve iz enega profila na drugega prenašajo prek strižnih napetosti med njima. Ker v večini primerov obtežba na stik ni koncentrirana, se pojavi moment in nam generira normalne napetosti v spoju in nam zaradi tega zmanjša nosilnost. Ta problem je mogoče odpraviti s pomočjo dvostranskega spoja, ki prenese silo samo prek strižne obremenitve [8]. Na sliki 5.1 so prikazane različne vrste lepljenja spojev.



Slika 5.1: Prikaz različnih vrst lepljenih spojev [8], [9].

Na splošno lahko lepljen spoj popusti na tri načine: popusti lepilo, popusti kohezija med lepilom in profilom in pa kombinacija prvih dveh.

Lepljeni spoji imajo pred mehanskimi spoji veliko prednosti [2],[8]:

- pri lepljenem spoju se obremenitev porazdeli po površini in posledično imamo bolj enakomerno porazdelitev napetosti v spoju in posledično večjo upogibno trdnost, odpornost na utrujanje in vibracijske napetosti,
- lepljeni spoji med profili so navadno bolj togi kot tradicionalni vijaačeni spoji,
- so bolj uporabni pri nepravilnih površinah,
- so cenejši in lažji,
- nekatera lepila so zelo močna, zato lahko tudi omejimo obseg lepljenih površin,
- enostavno je narediti estetske spoje,
- omogočajo prilagoditev različnih temperaturnih razteznostnih koeficientov, različnih materialov lepljenih med seboj,
- zagotavljajo celovitost spoja (pomembno pri povezovanju mostiščnih plošč)
- lepljeni spoji dobro prenašajo dinamične obremenitve.

Nekaj slabosti lepljenih stikov:

- pravila ravnanja pri izvedbi lepljenega spoja so še vedno v fazi raziskav, zato je projektiranje lepljenih spojev izredno zahtevno,
- nosilnost spoja ni sorazmerna s površino lepljenega dela, nosilnost povečujemo s površino vendar samo do neke meje, potem večja površina lepljenja ne povečuje več nosilnosti samega spoja. To je posledica dejstva, da je porušitev v lepljenem delu odvisna tudi od same nosilnosti lepila. Le to prenaša sile enega profila na drugega in se lahko poruši tudi sama plast lepila,
- porušitev v lepljenem spoju je hipna,
- veliko lepilnih komponent ima lastnosti, ki so odvisne od časa, na njih pa vplivajo tudi zunanji okoljski dejavniki (vlažnost in kemična sestava zraka), zatorej je težko določiti trajnost spoja,
- kontrola izvedenega lepljenega spoja je zahtevna, včasih tudi nemogoča,
- spoj je nemogoče razdreti brez poškodbe elementov stika, kar močno omejuje možnosti zamenjave poškodovanih delov in samo izvedbo razstavljivih konstrukcij.

Ker v lepljenih spojih pride do hipnih porušitev, so spoji v nosilnih konstrukcijah po navadi zavarovani z vijaki. Trenutno se uporabljajo dvokomponentna lepila na epoksi in poliuretanski osnovi.

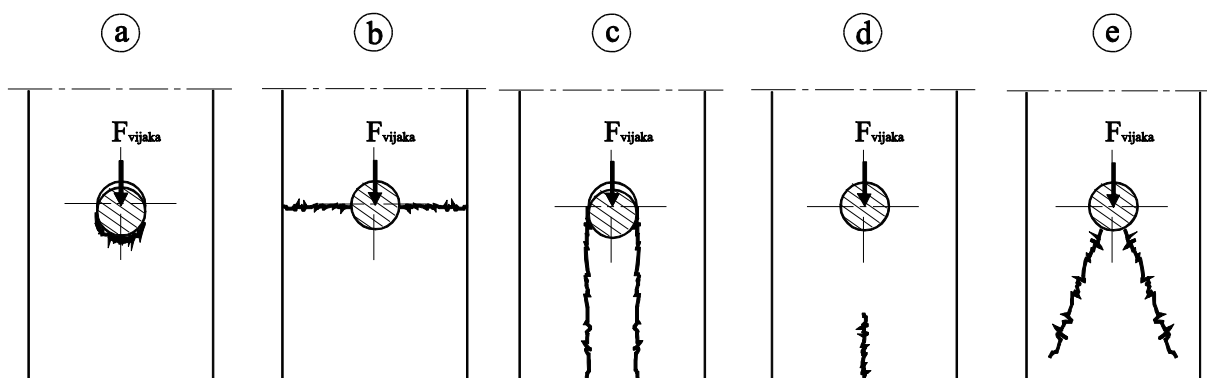
5.3 Mehanski vijačeni spoji

Tako kot v primeru geometrije prerezov profilov, tehnika mehanskih spojev armirane plastike temelji na rešitvah, ki se uporabljajo za jeklo in njegove zlitine [10,11]. Kovine so kategorizirane kot zvezne homogene in izotropne, armirane plastike pa so kategorizirane kot krhke, heterogene in anizotropne (ortotropne). Vlaken v kompozitu morajo biti neprekinjena, saj vsako prekinjeno vlakno zmanjša nosilnost elementa (luknja za vijak slabi nosilnost). Glavna prednost mehanskih vijačenih spojev pred lepljenimi spoji je v tem, da so delovna pravila definirana. Mehanske vijačene spoje je enostavno dimenzionirati s pomočjo priručnikov za dimenzioniranje. Večji proizvajalci profilov iz armiranih plastik imajo pogosto svoje patentirane načine izvedbe mehanskih spojev za posamezne elemente. Nekatere metode spajanja so predstavljene na sliki 5.2.



Slika 5.2: Prikaz različnih vrst mehanskih (vijačenih) spojev: a-spoj pod kotom 0° , b-spoj pod kotom 35° , c-spoj pod kotom 90° , d-spoj pod kotom 135° [9].

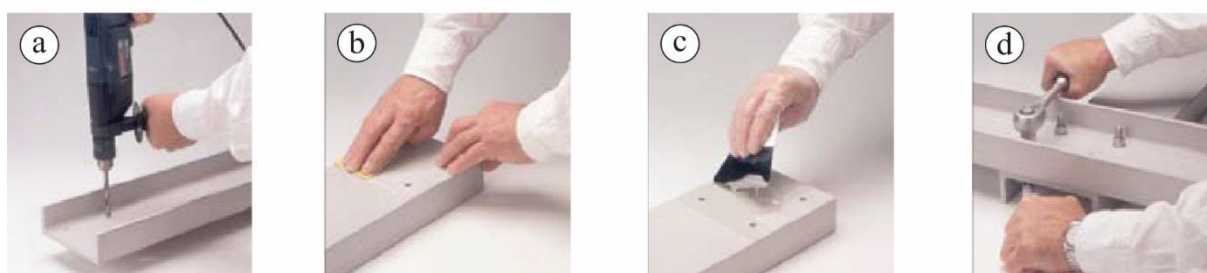
Porušni mehanizem mehanskega vijačenega spoja je odvisen od lokacije luknje glede na obremenjen rob in smer armaturnih vlaken v profilu. Primeri porušnih mehanizmov so prikazani na sliki 5.4: a–kontaktna, tlačna porušitev kompozita pred vijakom, vzporedno z vlakni, b–strižna porušitev prečno na vlakna, ob vijaku, c–strižna porušitev pred vijakom, vzporedno z vlakni, d–cepilna porušitev pred vijakom, vzporedno z vlakni, e–strižna porušitev diagonalno na vlakna pred vijakom.



Slika 5.3: Prikaz različnih vrst porušnih mehanizmov mehanskih vijaačenih spojev [2].

5.4 Kombinirani spoji

Številni testi različnih vrst spojev predlagajo kombinacijo vijaačenega in lepljenega spoja, saj lahko pravilno umeščen vijak preprečuje širjenje razpok, ki vodijo do porušitve lepljenega dela spoja [2]. Vijaki zagotavljajo podporo in potreben pritisk elementov med seboj v času sestavljanja in strjevanja lepila. Mehanski del spoja deluje samo kot rezerva lepljenemu delu in ta vrsta spojev zato ni ekonomična [2]. Slika 5.6 prikazuje primer lepljenega spoja v kombinaciji z vijaačnim spojem. Za lepljen del spoja se po navadi uporabljajo dvokomponentna lepila na epoksi in poliuretanski osnovi.



Slika 5.4: Prikaz izvedbe kombiniranega spoja: a–vrtanje lukenj za vijake, b–brušenje zaščitnega sloja in čiščenje lepljene površine, c–nanašanje lepila z grabljicami, d–zategovanje vijakov mehanskega stika [2].

5.5 Primerjava lepljenega, mehanskega in kombiniranega spoja

Iz preglednice 5.1, 5.2, 5.3 je razvidno, da ima vsaka vrsta spoja neke prednosti in slabosti. Pri mehanskem vijačenem spoju bi kot največjo prednost izpostavil predvsem njegovo duktilno obnašanje po 1. poškodbi. Material s tem skrbi za dodatno varnost pred hipno porušitvijo konstrukcije. Največja slabost mehanskih vijačenih spojev je majhna trdnost pri koncentrirani obtežbi.

Preglednica 5.1: Tipične značilnosti mehanskih vijačenih spojev iz armirane plastike [12].

Mehanski vijačeni spoji	
Prednosti	Slabosti
<ul style="list-style-type: none"> • ne rabi posebne obdelave površine • lahko se razstavi • enostaven pregled • duktilno obnašanje po 1. poškodbi 	<ul style="list-style-type: none"> • majhna trdnost pri koncentrirani obtežbi • posebna znanja potrebna pri sestavljanju • vodoodpornost in odpornost na zunanje vremenske vplive zahteva posebna tesnila in tesnilne mase • korozija kovinskih pritrdilnih elementov

Pri lepljenem spoju bi kot največjo prednost izpostavil predvsem veliko trdnost spoja. Kot slabost pa njegovo krhkost. Porušitev ob preobremenitvi spoja je krhka in hipna, lahko je vzrok za porušitev konstrukcije.

Preglednica 5.2: Tipične značilnosti lepljenih spojev iz armirane plastike [12].

Lepljeni spoji	
Prednosti	Slabosti
<ul style="list-style-type: none"> • dosežemo veliko trdnost • malo kosov • možnost korozije je minimizirana • gladka zunanja površina • togost 	<ul style="list-style-type: none"> • ni ga možno razstaviti • rabi posebno obdelavo površine • zahtevnejša kontrola • temperatura in velika vlažnost lahko vpliva na trdnost • krhek

Kombiniran spoj nam omogoča najboljše lastnosti mehansko vijaačenega in lepljenega spoja skupaj. Prednost tega je, da dobimo spoj z veliko trdnostjo in togostjo. Glavne obremenitve spoja prenaša lepilo, vijaačen del spoja je zgolj varnostna rezerva. Slabost takega spoja je neizkoriščenost vijakov v fazi, ko je spoj nepoškodovan.

Preglednica 5.3: *Tipične značilnosti kombiniranih spojev iz armirane plastike [12].*

Kombinirani spoji	
Prednosti	Slabosti
<ul style="list-style-type: none">• vijaki zagotavljajo podporo in pritisk med sestavljanjem in strjevanjem lepila• vijaki preprečujejo rast razpok	<ul style="list-style-type: none">• konstrukcijski vijaki so varnostna rezervna pri nepoškodovanem spoju, vijaki nič ne nosijo

Iz preglednic 5.1, 5.2, 5.3 je razvidno, da ima lepljen spoj največ dobrih značilnosti med vsemi tremi spoji. Kljub tej ugotovitvi bi za najbolj primeren spoj za spajanje armirane plastike izbral kombiniran spoj. Dobimo sicer precej drag a zelo varen spoj. Primer varnosti: Pri preobremenitvi spoja pride do 1. poškodbe, zaradi krhke in hipne porušitev lepljene površine. Obtežbo ob porušitvi lepljene površine prevzame mehansko vijaačen del spoja. Pri preobremenitvi mehansko vijaačenega dela spoja pride do 2. poškodbe vendar se spoj tudi tokrat ne poruši. V spoju nastopi duktilnosti materiala, ki nam omogoča sanacijo spoja preden se zgodi dokončna porušitev.

Kombiniran spoj ima dva varnostna mehanizma pred porušitvijo, zato je najbolj primeren kot konstrukcijski spoj armiranih plastik.

Preglednica 5.4 predstavlja lastnosti različnih vrst spojev armiranih plastik. Kot najbolj primeren se zopet izkaže kombiniran spoj, ki izkazuje najboljše lastnosti pri koncentracijah napetosti, razmerju nosilnost/teža, tesnjenju, odpornosti na utrujanje in stroških orodja za vgradnjo.

Preglednica 5.4: Lastnosti različnih vrst spojev [12].

Lastnosti	Spoji		
	Mehanski vijačeni	Lepljeni	Kombinirani
Koncentracija napetosti na spoju	visoka	srednja	srednja
Razmerje nosilnost/teža	nizko	srednje	srednje
Tesnjenje (vodoodporen)	ne	da	da
Toplotna izolacija	ne	da	ne
Električna izolacija	ne	da	ne
Estetika (lepi spoji)	slaba	dobra	slaba
Odpornost na utrujanje	slaba	dobra	dobra
Občutljiv na površinsko luščenje	ne	da	ne
Razstavljanje	možno	nemogoče	nemogoče
Kontrola	enostavna	zahtevna	zahtevna
Zahtevana toplota ali pritisk pri spajanju	ne	da/ne	da/ne
Stroški orodja za vgradnjo	nizki	visoki	nizki
Polna nosilnost, čas	takoj	dolgo	dolgo

6 LABORATORIJSKI PREIZKUS

6.1 Namen preizkusov

V vijadenem spoju se obremenitve med elementi prenašajo preko stebela vijaka in preklonih kompozitnih plošč. Vijadeni spoji se pogosto uporabljajo pri povezovanju konstrukcijskih elementov iz armirane plastike predvsem zaradi hitrosti vgradnje in ekonomičnosti. Vijadeni spoji zagotavljajo prenos nateznih in tlačnih obremenitev. Steblo vijaka in kompozita iz armirane plastike imata v spoju majhno kontaktno površino, zato pri natezni obremenitvi nastanejo veliki bočni pritiski, ki v kompozitu povzročijo koncentracije napetosti. S preizkusi želimo določiti mejno nosilnost in načine porušitev preklonih kompozitnih spojev z enim vijakom obremenjenih v nategu.

6.2 Materialne lastnosti armirane plastike

Preizkušanci iz armirane plastike so proizvedeni z avtomatsko proizvodno metodo vlečenja (pultruzija) v danskem podjetju Fiberline Composites A/S. Proizvajalec tudi predpisuje materialne lastnosti in načine porušnih mehanizmov v vijadenem spoju.

Vrednosti materialnih lastnosti v preglednici 6.1 in 6.2 veljajo v temperaturnem razponu od -20°C do $+60^{\circ}\text{C}$, če temperatura presega $+60^{\circ}\text{C}$ se morajo vrednosti vseh materialnih lastnosti zmanjšati z ustreznim varnostnim faktorjem. Preglednica 6.1 in 6.2 sta narejeni na podlagi eksperimentalnih preizkusov porušitve pultruzijsko proizvedenih konstrukcijskih profilov. Vrednosti v njej so osnovne porušitvene vrednosti za potrebe izračunov spojev.

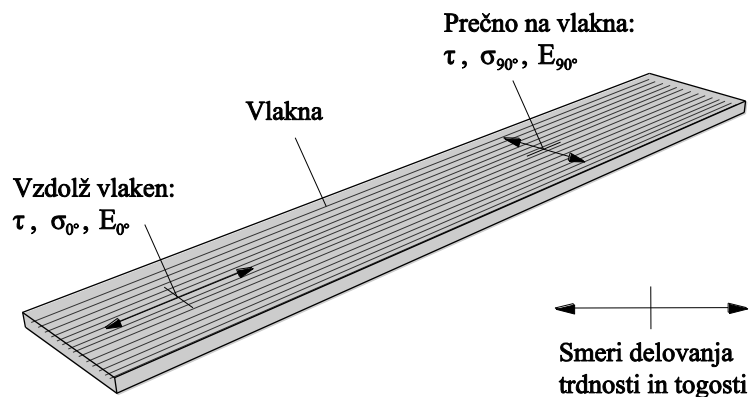
Preglednica 6.1: Vrednosti za različne trdnosti v suhih pogojih za material kakovosti E17 [2], [9].

Vrednosti za različne trdnosti v suhih pogojih za material E17		E17	Enota
Upogibna trdnost, 0°	$f_{b,0^{\circ}}$	170	MPa
Upogibna trdnost, 90°	$f_{b,90^{\circ}}$	70	MPa
Natezna trdnost, 0°	$f_{t,0^{\circ}}$	170	MPa
Natezna trdnost, 90°	$f_{t,90^{\circ}}$	30	MPa
Tlačna trdnost, 0°	$f_{c,0^{\circ}}$	170	MPa
Tlačna trdnost, 90°	$f_{c,90^{\circ}}$	50	MPa
Strižna trdnost	f_t	15	MPa
Trdnost na steblo vijaka, vzporedno z vlakni, 0°	$f_{cB,0^{\circ}}$	90	MPa
Trdnost na steblo vijaka, prečno na vlakna, 90°	$f_{cB,90^{\circ}}$	50	MPa

Preglednica 6.2: Vrednosti za različne togosti v suhih pogojih za material kakovosti E17 [2], [9].

Vrednosti različnih togosti v suhih pogojih za material E17		E17	Enota
Modul elastičnosti	$E_{0^{\circ}}$	17 000	MPa
Modul elastičnosti	$E_{90^{\circ}}$	5 000	MPa
Strižni modul	G	3 000	MPa

Elastični in strižni modul se spreminjata glede na geometrijo prečnega prereza in količino armiranja. Smeri materialnih lastnosti so prikazane na sliki 6.1.

**Slika 6.1:** Glavne smeri trdnosti in togosti.

Kot 0° kaže v vzdolžni smeri vlaken v profilu, ki je hkrati tudi smer vlečenja v vlečnem (pultruzijskem) postopku izdelave. Kot 90° kaže v prečni smeri glede na potek vlaken v profilu. Materialne lastnosti v prečni smeri vlaken so šibkejša smer vlečnih (pultruzijskih) profilov, zato se jih uporablja v glavnem za izračunavanje spojev.

6.3 Analitične formule za izračun bočnega pritiska vijaka v vzdolžni smeri (0°)

Spodaj navedene formule so povzete po Fiberline priročniku za dimenzioniranje konstrukcij iz armirane plastike. Fiberline je za izdelavo priročnika (Fiberline Design Manual), kot osnovo uporabil priročnik EUROCOMP Design Code and Handook [12] v tem priročniku so zbrana vsa priporočila in dobre prakse pri dimenzioniranju armiranih plastik v konstrukcijah.

Porazdelitev napetosti v laminatu okoli vijaka s kratkim navojem so prikazane na sliki 6.2.

Nosilnost vijaka izpostavljenega strigu bo zadostna, kadar napetosti v laminatu ne presežejo nosilnosti vijaka.

$F_{vijaka,d}$ je strižna sila, ki deluje na steblo vijaka in se jo določi s formulo:

$$F_{vijaka,d} = \frac{d * t * f_{cB,0^{\circ}}}{\gamma_m}; \quad \gamma_m = 1,3 \quad (1)$$

kjer je:

$f_{cB,0^{\circ}}$ - trdnost na steblo vijaka, vzporedno z vlakni, 0°

d - premer vijaka

t - debelina laminata

γ_m - varnostni faktor

Vrednosti v zgornji formuli temeljijo na predpostavkah, prikazanih na spodnji sliki 6.2:

$$a = 3,5 * d \quad (2)$$

$$b = 1,0 * d \quad (3)$$

$$c = 2,0 * d \quad (4)$$

kjer je:

a - razdalja od središčne črte vijaka do roba laminata v smeri sile, vzdolžna smer (0°)

b - širina območja pred vijakom, kjer se pojavijo medplastne strižne sile

c - razdalja od središčne črte vijaka pravokotno do roba laminata, prečna smer (90°)

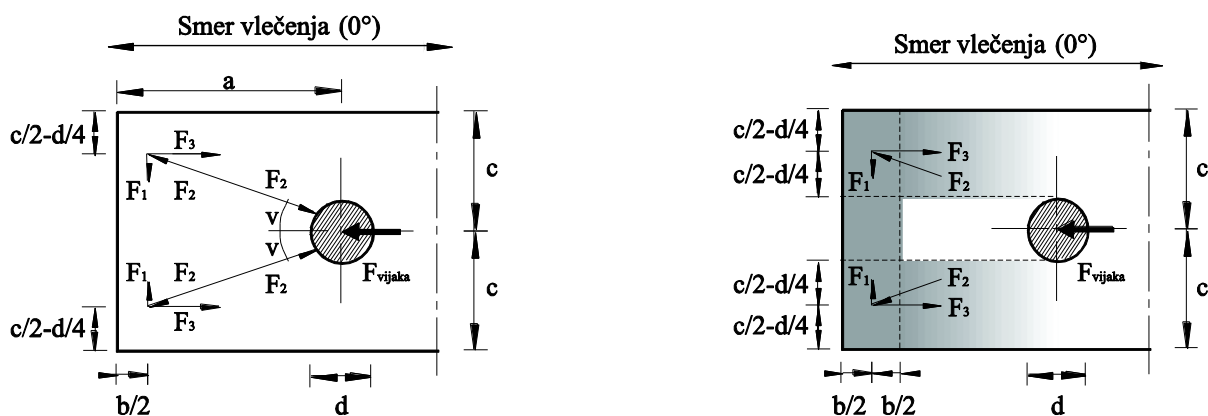
Teoretični izrazi za nosilnosti armirane plastike:

Statični pogoji:

$$F_1 = \frac{1}{2} * F_{vijaka} * \tan(v) \quad (6)$$

$$F_2 = \frac{F_{vijaka}}{2 * \cos(v)} \quad (7)$$

$$F_3 = \frac{1}{2} * F_{vijaka} \quad (8)$$



Slika 6.2: Porazdelitev napetosti v laminatu okoli vijaka.

Geometrija:

a - razdalja od središča luknje vijaka do obremenjenega roba profila, vzdolžna smer (0°)

b - širina območja pred vijakom, kjer se pojavijo medplastne strižne sile

c - razdalja od središča luknje vijaka pravokotno do roba profila, prečna smer (90°)

d - premer vijaka

v - kot diagonalnega tlaka (formula 5)

$$\tan(v) = [c/2 + d/4]/[a - b/2] \quad (5)$$

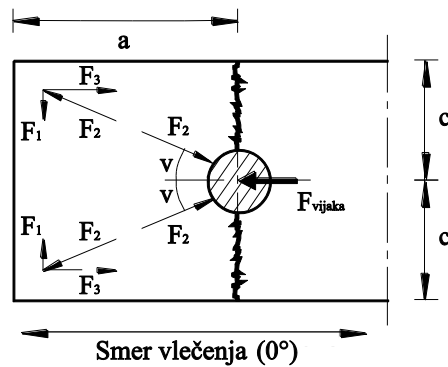
t - debelina profila

Diagrami sil za različne porušne mehanizme (v nadaljevanju PM1, PM2, PM3) in porušne linije mehanizmov so prikazane na spodnjih slikah.

PM1: Strižna porušitev prečno na vlakna, poleg vijaka (porušitev po neto prerezu).

$$\frac{F_3}{\left(\frac{c-d}{2}\right) * t} \leq f_{t,0} \quad (9)$$

Preobremenitev vlaken v smeri 0°, Slika 6.3.

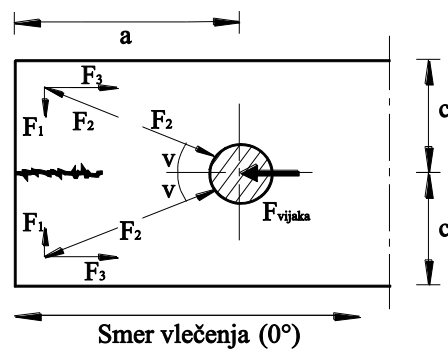


Slika 6.3: Strižna porušitev prečno na vlakna, poleg vijaka (porušitev po neto prerezu) [2].

PM2: Cepilna porušitev pred vijakom v vzdolžni smeri.

$$\frac{F_1}{b * t} \leq f_{t,90} \quad (10)$$

Preobremenitev vlaken v smeri 90°, Slika 6.4.

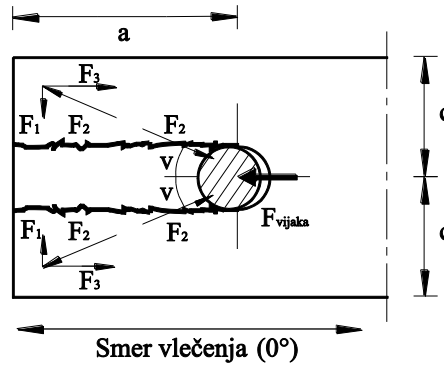


Slika 6.4: Cepilna porušitev pred vijakom v vzdolžni smeri [2].

PM3: Strižna porušitev pred vijakom v vzdolžni smeri (strig).

$$\frac{F_{vijaka}}{2 * \left(a - \frac{d}{2}\right) * t} \leq f_t \quad (11)$$

Strižna napetost prekoračena v prikazani liniji pretrga, Slika 6.5.

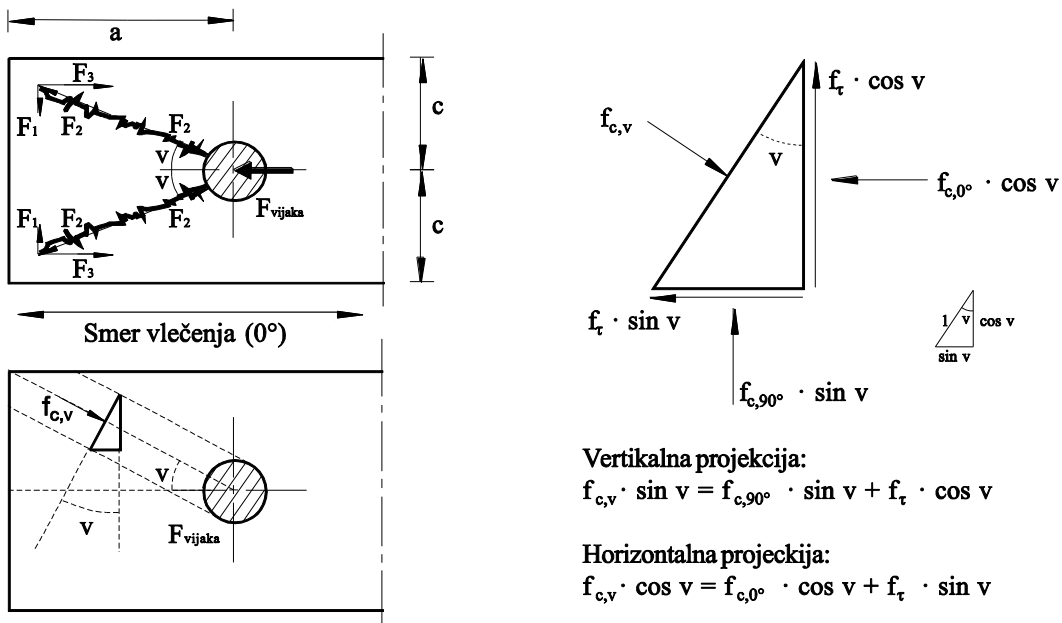


Slika 6.5: Strižna porušitev pred vijakom v vzdolžni smeri (strig) [2].

PM4: Strižna porušitev diagonalno na vlakna pred vijakom vzdolžni smeri.

$$\frac{F_2}{d * t} \leq \min f_{c,v} \quad (12)$$

Tlačna napetost prekorači tlačno trdnost v diagonalni porušitvi, Slika 6.6.

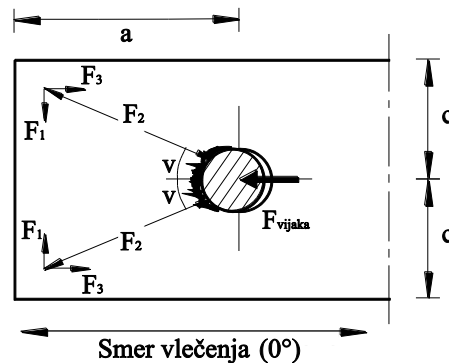


Slika 6.6: Strižna porušitev diagonalno na vlakna pred vijakom vzdolžni smeri [2].

PM 5: Tlačna porušitev pred vijakom (ovalizacija)

$$\frac{F_{vijaka}}{d * t} \leq f_{c,0} \quad (13)$$

Kontaktna tlačna napetost med vijakom in kompozitom prekorači tlačno trdnost materiala, zato pride do ovalizacije luknje (ugnezditve vijaka), Slika 6.7.

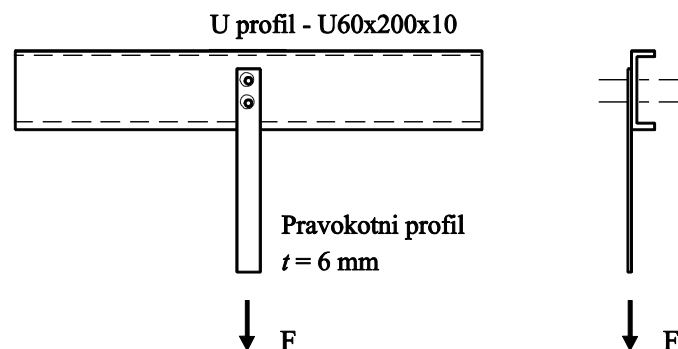


Slika 6.7: Tlačna porušitev pred vijakom (ovalizacija) [2].

6.4 Primer izračuna natezno obremenjenega vijačenega spoja, smeri 0° (vzdolž vlaken)

S spodnjim primerom želim prikazati način dimenzioniranja vijačenega spoja natezno obremenjenega pravokotnega profila iz armiranih plastik. Način dimenzioniranja predpisuje proizvajalec profilov v svojem priročniku za dimenzioniranje [2]. Spoj je dimenzioniran za mejno stanje nosilnosti.

Način pritrditve natezno obremenjenega pravokotnega profila je prikazan na sliki 6.8.



Slika 6.8: Primer vijačenega spoja [2].

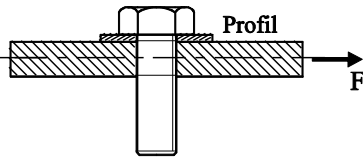
Obremenitev je vlečna (natezna) sila 1000 kg ali 9,82 kN. Debelina pravokotnega profila je $t = 6$ mm. Trenje med dvema točkama pritrditve ni upoštevano.

Dimenzioniranje poteka v dveh korakih. V prvem koraku se izbere velikost vijaka v drugem pa širino pravokotnega profila.

Izberem vijak M10. V preglednici 6.3, lahko odčitamo maksimalno nosilnost armirane plastike debeline 6mm v kombinaciji z vijakom M10, ki je v vzdolžni smeri profila enaka 6,9 kN. Uporabiti je potrebno dva vijaka M10, ki v vzdolžni smeri profila skupaj nosita 13,8 kN. EUROCOMP varnostni standardi so vključeni v preglednici, kar nam zagotavlja potrebno dimenzijsko varnost.

Preglednica 6.3: Nosilnost vijakov izpostavljenih strigu, preglednica povzeta po Fiberline priročniku [2].

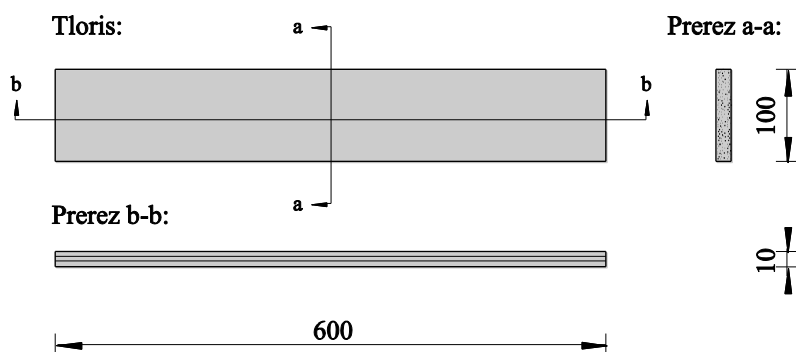
Nosilnost na steblo vijaka (F) v kN, vzporedno z vlakni, 0°																		
Vijak	Nosilnost na strižno ravnino [kN]		Debelina profila [mm]															
	1	2	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
M6	2,7	5,4	3,5	4,2	4,8	5,5	6,2	6,9	7,6	8,3	9	9,7	10,4	11,1	11,8	12,5	13,2	13,8
M8	4,8	9,5	4,6	5,5	6,5	7,4	8,3	9,2	10,2	11,1	12	12,9	13,8	14,8	15,7	16,6	17,5	18,5
M10	7,4	14,9	5,8	6,9	8,1	9,2	10,4	11,5	12,7	13,8	15	16,2	17,3	18,5	19,6	20,8	21,9	23,1
M12	10,7	21,4	6,9	8,3	9,7	11,1	12,5	13,8	15,2	16,6	18	19,4	20,8	22,2	23,5	24,9	26,3	27,7
M14	14,6	29,2	8,1	9,7	11,3	12,9	14,5	16,2	17,8	19,4	21	22,6	24,2	25,8	27,5	29,1	30,7	32,3
M16	19	38,1	9,2	11,1	12,9	14,8	16,6	18,5	20,3	22,2	24	25,8	27,7	29,5	31,4	33,2	35,1	36,9
M20	30	59	11,5	13,8	16,2	18,5	20,8	23,1	25,4	27,7	30	32,3	34,6	36,9	39,2	41,5	43,8	46,2
M22	36	72	12,7	15,2	17,8	20,3	22,8	25,4	27,9	30,5	33	35,5	38,1	40,6	43,2	45,7	48,2	50,8
M24	43	86	13,8	16,6	19,4	22,2	24,9	27,7	30,5	33,2	36	38,8	41,5	44,3	47,1	49,8	52,6	55,4
M27	54	109	15,6	18,7	21,8	24,9	28	31,2	34,3	37,4	40,5	43,6	46,7	49,8	53	56,1	59,2	62,3
M30	67	134	17,3	20,8	24,2	27,7	31,2	34,6	38,1	41,5	45	48,5	51,9	55,4	58,8	62,3	65,8	69,2
M36	96	193	20,8	24,9	29,1	33,2	37,4	41,5	45,7	49,8	54	58,2	62,3	66,5	70,6	74,8	78,9	83,1
M42	131	262	24,2	29,1	33,9	38,8	43,6	48,5	53,3	58,2	63	67,8	72,7	77,5	82,4	87,2	92,1	96,9
M48	171	343	27,7	33,2	38,8	44,3	49,8	55,4	60,9	66,5	72	77,5	83,1	88,6	94,2	99,7	105,2	110,8

<p>Vrednosti veljajo za mejno stanje nosilnosti</p> <p>Varnostni razred: normalno</p> <p>Kvaliteta vijaka: A4</p> <p>Podložka pod glavo vijaka in matico: $D_{\text{podložke}} = d_{\text{vijaka}} * 2$</p> <p>Luknja v laminatu za potrebe vijaka: $D_{\text{luknje}} = d_{\text{vijaka}} + 1\text{mm}$</p>	
--	--

Širina pravokotnega profila se določi glede na velikost vijaka. V poglavju 6.3, analitične formule za izračun bočnega pritiska vijaka v vzdolžni smeri (0°) laminata armirane plastike nam formula (4) in slika 6.2 prikazuje minimalno razdaljo središčne linije vijaka na rob (90°) pravokotnega profila, $c = 2*d$ ($2*$ premer vijaka). Skupna širina pravokotnega profila znaša $4*d$ ali $4*10 \text{ mm} = 40 \text{ mm}$. Minimalna razdalja med središčno linijo vijaka in roba profila (0°) nam prikazuje formula (2) in mora biti vsaj $3,5*d$ ali 35 mm . Razdalja med dvema vijakoma mora biti $4*d = 4*10 \text{ mm} = 40 \text{ mm}$.

6.5 Priprava in izračun dimenzij preizkušancev

Profile v obliki pravokotnih lamel iz armirane plastike sem pridobil pri danskem proizvajalcu Fiberline Composites A/S. Skupno je bilo 12 pravokotnih profilov dimenzij 100*10*600 mm (Slika 6.9). Kvaliteta pultruzijsko izdelanih profilov je bila E17 in je zadostila pogojem evropskega standarda EN 13706. Materialne lastnosti profilov E17 so prikazane v preglednici 6.1.



Slika 6.9: Dimenzije pravokotnih profilov iz armirane plastike.

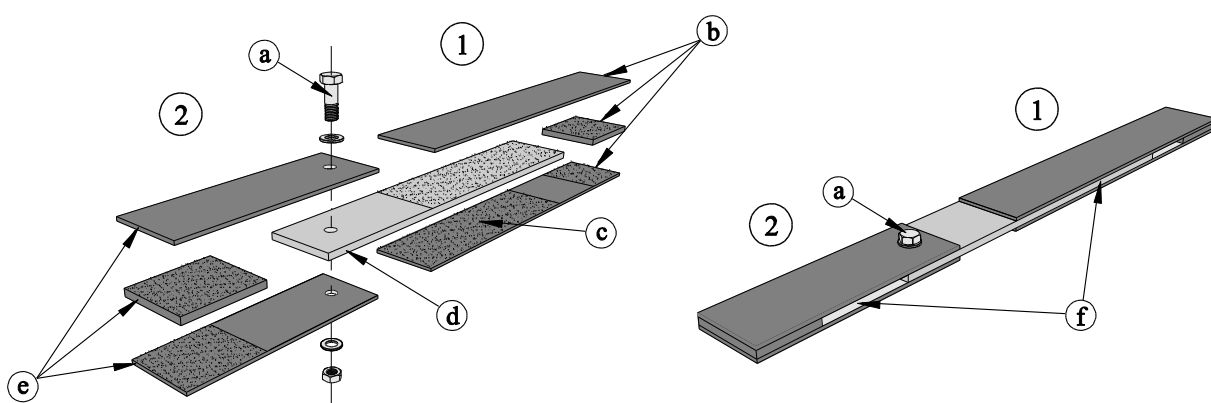
Opis sestave profilov iz armirane plastike (Strip100*10 mm, E17):

- Mehanske lastnosti materiala so: E17,
- Armaturna vlakna so iz steklenih vlaken: E-glass,
- Procent vlaken v profilu: 72,5% je vseh vlaken v profilu od tega v smeri 0°-79,4% in smeri 90°-8,1%,
- Matrica je poliestrska z dodanim aditivom, ki preprečuje širitev ognja: Isophatalic polyester P4506 Fireretardent (*Chlorinated Parafin* (C14-17):0-10%, *Antimony Trioxide* (ATO): 0-8% - classification Xn, R40 carc 3 (carcinogenic), *Aluminium Trihydroxide* (AHT):0-30%)),
- Zaključni sloj vsebuje površinsko tančico za zaščito pred UV žarki in zaščito v korozivnih okoljih: Surface veil,
- Barva profila je: RAL 7035 similar,
- Toleranca izdelave je: Standard,
- Toleranca odreza je: +0/-2 mm,
- Površinski premaz kot dodatna mehanska zaščita,
- Profili so bili narejeni v večji seriji.

6.6 Zasnova in opis preizkušanca

Z izbiro geometrij preizkušancev sem želel opazovati porušne mehanizme in preveriti različne stopnje duktilnosti spoja glede na oddaljenost središča luknje od roba laminata. Dimenzijo vijaka sem izračunal s formulo (4) glede na pridobljen pravokotni profil. Dimenzija vijaka je za širino mojega profila znašala M25. Vijak teh dimenzij za konstrukcijske namene ne obstaja, zato sem izbral vijak dimenzij M24 in kvalitete 8.8. S formulo (1) sem izračunal maksimalno računsko strižno silo, ki lahko preko kompozita deluje na vijak. Upoštevan je varnostni faktor $\gamma_m = 1,0$. Sila znaša $F_{vijaka,d} = 21,6$ kN. Silo sem po priporočilih podjetja Fiberline povečal za približno 3,5 in dobil sem silo $F_{vijaka,d} = 75,6$ kN ob porušitvi s katero sem lahko v nadaljevanju preveril ustreznost izbranih elementov spoja.

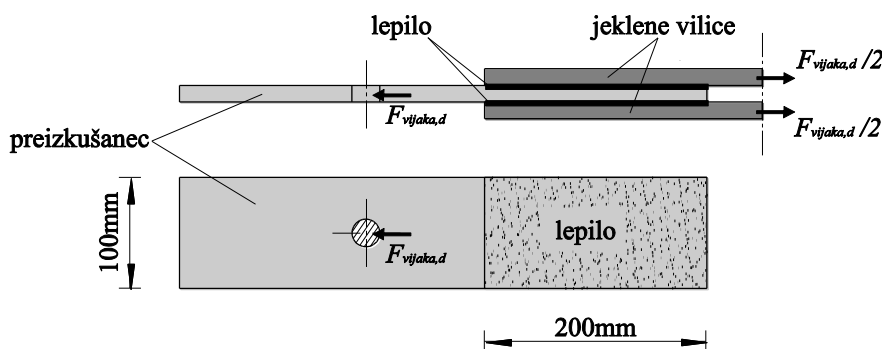
Spoj je sestavljen iz dveh ločenih delov (Slika 6.10 f) ter vijaka in podložk (Slika 6.10 a). Prvi del je sestavljen iz profila armirane plastike lepljenega v dve preklopni jekleni pločevini z jekleno ojačitvijo (Slika 6.10 b,d). Drugi del je sestavljen iz dveh preklopnih jeklenih pločevin in ojačitvijo (Slika 6.10 e). Izbrane jeklene preklopne pločevine so bile kvalitete S235, širine $b = 100$ mm in debeline $t = 5$ mm. Ojačitev je bila iz pločevine kvalitete S235, širine $b = 100$ mm in debeline $t = 10$ mm.



Slika 6.10: Zasnova preizkušanca: a-vijak s kratkim navojem, matico in podložk, b-toge jeklene vilice z ojačitvijo, c-epoksi lepilo »Sikadur 330«, d-preizkušanece iz armirane plastike, e- toge jeklene vilice z ojačitvijo, f-sestavljene preizkušanece pripravljen za vpetje.

6.5.1 Kontrola dolžine lepljenja profila iz armirane plastike v toge jeklene vilice

Lepilo primerno za lepljenje armirane plastike in jekla je dvokomponentno epoksi lepilo (Sikadur-330). Maksimalna sprejemna trdnost po tehničnih specifikacijah v idealnih pogojih vgradnje je $\sigma_s = 30$ N/mm². Zaradi varnosti in nepoznavanja metode vgrajevanja sem za potrebe izračuna vzel $\sigma_s = 6$ N/mm² na površini $A = 20000$ mm². Sila, ki jo mora prevzeti posamezen del lepljenega spoja je $F_{vijaka,d}/2 = 37,8$ KN. F_s je maksimalna sila, ki jo prevzame posamezna lepljena ploskev (Slika 6.11).



Slika 6.11: Skica lepljenja armirane plastike v toge jeklene vilice.

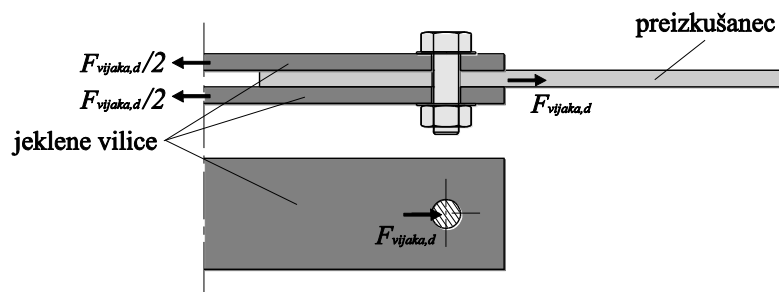
$$F_s = \sigma_s * A \quad (14)$$

$$F_s = \frac{0,006 \text{ kN}}{\text{mm}^2} * 20000 \text{ mm}^2 = 120 \text{ kN}$$

$F_{vijaka,d}/2 \leq F_s \rightarrow \text{ok}$, lepljen del spoja bo prevzel obremenitev.

6.5.2 Kontrola nosilnosti oslabljenega prereza

Vilice so sestavljene iz dveh pločevin debeline $t = 5 \text{ mm}$, širine $b = 100 \text{ mm}$. Kvaliteta jekla je S235, natezna trdnost jekla $f_u = 0,36 \text{ kN/mm}^2$, $\gamma_{m2} = 1,25$. Dimenzija luknje v pločevini za potrebe vijaka $d_0 = d + 2 \text{ mm} = 26 \text{ mm}$. Središče luknje vijaka v jeklenih vilicah je na oddaljenosti $e_1 = 2.0 * d_0 = 52 \text{ mm}$, premer luknje pa je $d_0 = 26 \text{ mm}$ [13]. Silka 6.12, ki jo mora posamezna pločevina prevzeti je $F_{vijaka,d}/2 = 37,8 \text{ kN}$ (Slika 6.12)



Slika 6.12: Skica obremenitve toge jeklene vilice.

$$A_{neto} = (b * t) - (d_0 * t) \quad (15)$$

$$A_{neto} = (100 \text{ mm} * 5 \text{ mm}) - (26 \text{ mm} * 5 \text{ mm}) = 370 \text{ mm}^2$$

Projektna nosilnost oslabiljenega prereza $N_{u,Rd}$:

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 * A_{neto} * f_u}{\gamma_{M2}} \quad (16)$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 * 370 \text{ mm}^2 * 0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 95,90 \text{ kN}$$

$F_{vijaka,d}/2 \leq N_{u,Rd} \rightarrow ok$, oslabiljen prerez bo prenesel obremenitev.

6.5.3 Kontrola strižne nosilnosti vijaka

Vijak preko katerega se prenaša sila je M24 s premerom, $d = 24 \text{ mm}$, kvalitete 8.8, natezna trdnost $f_u = 0,80 \text{ kN/mm}^2$, površina prereza $A = 452 \text{ mm}^2$ in $\gamma_{m2} = 1,25$ [13]. Sila, ki jo more prenesti ena strižna ravnina v vijaku je $F_{vijaka,d}/2 = 37,8 \text{ kN}$ (Slika 6.12)

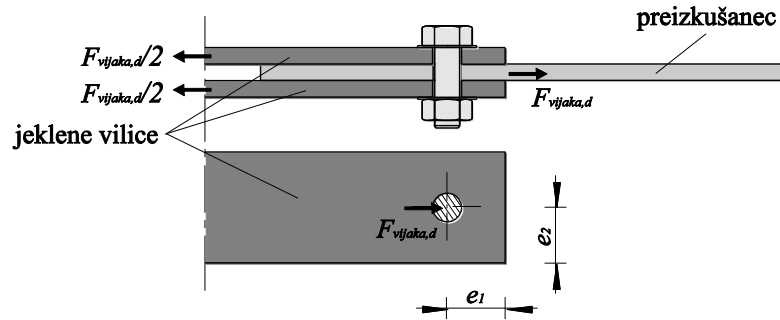
$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} \quad (17)$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 * 0,80 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} * 452 \text{ mm}^2}{1,25} = 173,57 \text{ kN}$$

$F_{vijaka,d}/2 \leq F_{v,Rd} \rightarrow ok$, vijak bo prenesel strižne obremenitve.

6.5.4 Kontrola nosilnosti vijaka na bočni pritisk

Vijak preko katerega se prenaša sila je M24 s premerom, $d = 24 \text{ mm}$, kvalitete 8.8, natezna trdnost $f_u = 0,80 \text{ kN/mm}^2$. Vilice so sestavljene iz dveh pločevin debeline $t = 5 \text{ mm}$, širine $b = 100 \text{ mm}$. Kvaliteta jekla je S235, natezna trdnost jekla $f_u = 0,36 \text{ kN/mm}^2$, $\gamma_{m2} = 1,25$. Luknja v pločevini za vijak, $d_0 = 26 \text{ mm}$. Središče luknje vijaka v jeklenih vilicah je od roba pločevine v vzdolžni smeri obremenjevanja oddaljena $e_1 = 2,0 * d_0 = 52 \text{ mm}$ in v prečni smeri $e_2 = 50 \text{ mm}$ ($b = 100 \text{ mm}$) (Slika 6.13). Premer luknje je $d_0 = d + 2 \text{ mm} = 26 \text{ mm}$ [13]. Sila, ki jo mora posamezna pločevina prevzeti je $F_{vijaka,d}/2 = 37,8 \text{ kN}$



Slika 6.13: Skica obremenitve toge jeklene vilice in prikaz odmikov e_1 in e_2 .

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} \quad (18)$$

$$k_1 = \min\left(2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \leq 2,5; 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \leq 2,5\right) \quad (19)$$

$$k_1 = \min\left(2,8 * \frac{50}{26} - 1,7; 1,4 * \frac{0}{26} - 1,7; 2,5\right) = \min(3,7; 0; 2,5) \rightarrow k_1 = 2,5$$

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{3 * d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1\right) \quad (20)$$

$$\alpha_b = \min\left(\frac{52}{3 * 26}; \frac{80}{36}; 1\right) = \min(0,66; 2,2; 1) \rightarrow \alpha_b = 0,6$$

$$t = \min(2 * t_1; t_2)$$

$$t = \min(2 * t_1; t_2) = \min(2 * 5; 10) \rightarrow t = 10 \text{ mm}$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,67 * 0,36 \text{ kN/mm}^2 * 24 \text{ mm} * 10 \text{ mm}}{1,25} = 144,72 \text{ kN}$$

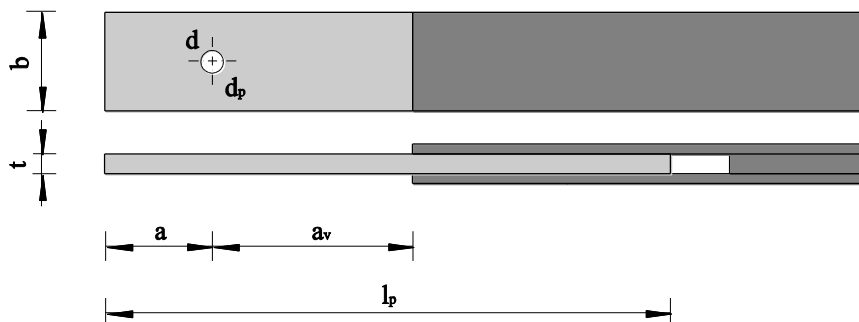
$$F_{vijaka,d} \leq F_{b,Rd} = 144,72 \text{ kN} \rightarrow \text{ok, vijak bo prenesel bočni pritisk.}$$

6.5.5 Dimenzije preizkušancev

Dimenzije preizkušancev iz armirane plastike so opisane v preglednici 6.4, skica z geometrijskimi oznakami pa je predstavljena na sliki 6.15. Glavna razlika med preizkušanci je oddaljenost središča luknje vijaka a od roba preizkušanca, kar je tudi razvidno iz preglednice 6.4.

Preglednica 6.4: Dimenzije preizkušancev.

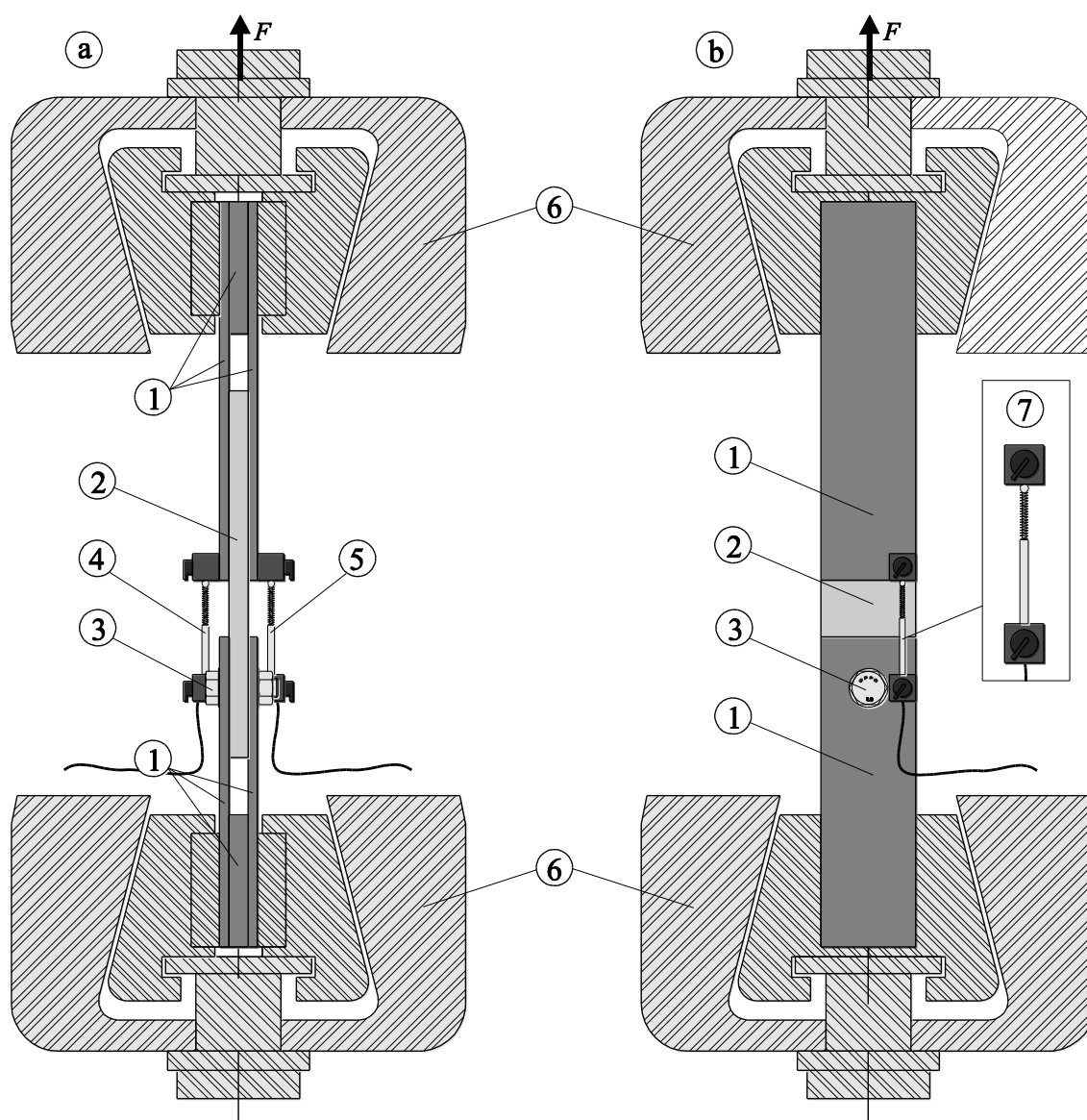
Kratka oznaka preizkušanca	Debelina t [mm]	Dolžina l_p [mm]	Širina b [mm]	Razdalja od roba do središčne linije luknje a [mm]	Premer vijaka d [mm]	Premer luknje zaradi vijaka $d_p + 1\text{mm}$ [mm]	Razdalja do togega vpetja v jeklene vilice a_v [mm]
P1-1.5d-1	10	342	100	36	24	25	107
P1-1.5d-2	10	342	100	36	24	25	107
P1-1.5d-3	10	342	100	36	24	25	107
P1-1.5d-4	10	342	100	36	24	25	107
P2_3.5d-1	10	391	100	84	24	25	107
P2_3.5d-2	10	391	100	84	24	25	107
P2_3.5d-3	10	391	100	84	24	25	107
P2_3.5d-4	10	391	100	84	24	25	107
P3_7.0d-1	10	475	100	168	24	25	107
P3_7.0d-2	10	475	100	168	24	25	107
P3_7.0d-3	10	475	100	168	24	25	107
P3_7.0d-4	10	475	100	168	24	25	107



Slika 6.14: Skica geometrijskih oznak preizkušancev.

6.7 Vpetje preizkušanca v hidravlično napravo Instron in namestitev induktivnih merilcev

Za potrebe preizkusov bočnega pritiska jeklenega vijaka na armirano plastiko sem izbral hidravlično napravo Instron. Na sliki 6.14 je predstavljeno vpetje preizkušanca v napravo in pritrditev zunanjih induktivnih merilnih naprav (LVDT): a-stranski pogled vpetja preizkušanca v hidravlično napravo Instron: 1-jeklene vilice z ojačitvijo, 2-preizkušanec iz armirane plastike, 3-vijak s kratkim navojem, matico in podložko, 4-induktivni merilec (LVDT1), 5-induktivni merilec (LVDT2), 6-čeljust hidravlične naprave Instron; b-frontalni pogled vpetja preizkušanca v hidravlično napravo Instron: 1-jeklene vilice z ojačitvijo, 2-preizkušanec iz armirane plastike, 3-vijak s kratkim navojem, matico in podložko, 6-čeljust hidravlične naprave Instron, 7-induktivni merilec LVDT2.



Slika 6.15: Skica vpetja preizkušanca in namestitve induktivnih merilcev pomikov (LVDT).

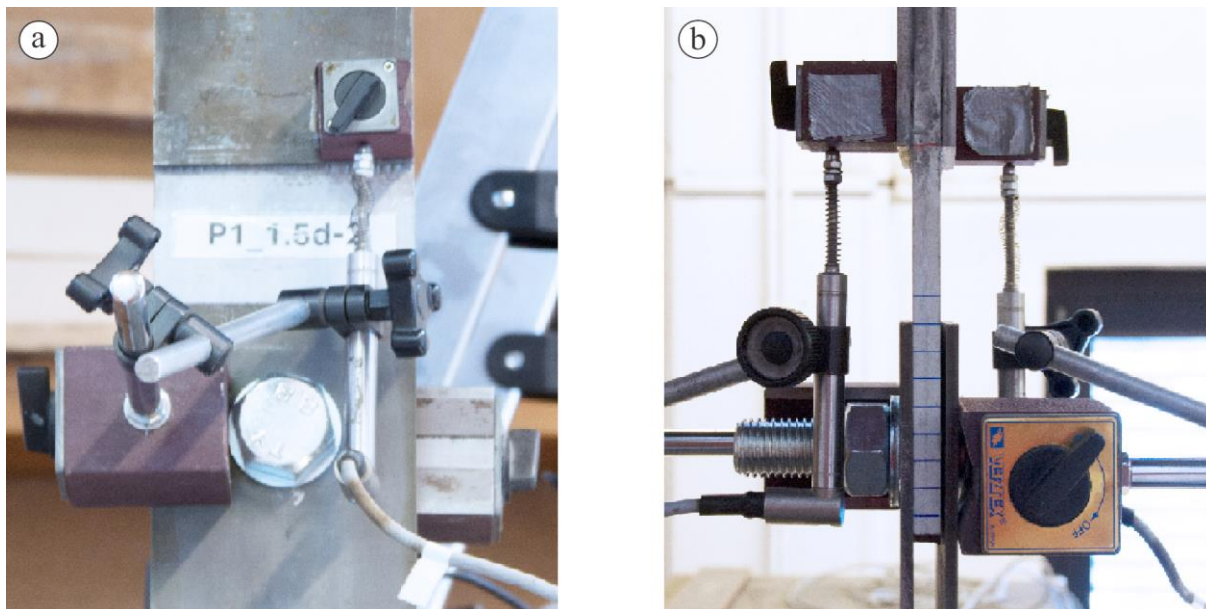
6.8 Oprema in zajem podatkov

Preizkusi so bili izvedeni v prostorih konstrukcijsko prometnega laboratorija Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Za potrebe preizkusov sem izbral hidravlično napravo Instron (Slika 6.16), merilne inštrumente vgrajene v samo napravo in dodatne zunanje merilne inštrumente prikazane na sliki 6.17. Naprava in vsi merilni instrumenti so bili vodeni s pomočjo računalnika preko kontrolnega vmesnika.



Slika 6.16: Instron naprave za potrebe izvedbe preizkusa.

Silo sem s pomočjo hidravlike uvajali v bat naprave s hitrostjo 0,025mm/s (1,5mm/min), takšna hitrost predstavlja statične razmere pri obremenjevanju. Sila, ki jo lahko uvajamo preko bata je 1000kN.



Slika 6.17: Prikaz namestitve induktivnih merilnih naprav na preizkušane P1_1.5d-2: a–induktivni merilec LVDT2, b–induktivni merilec LVDT1 levo in LVDT2 desno sliki.

Merilna oprema v Instron hidravlični napravi je merila pomike in silo v hidravličnem batu. Zunanji induktivni merilci (LVDT) so merili pomike vijaka v spoju. Preizkušanec je imel zaradi natančnosti meritev na obeh straneh spoja po en LVDT merilnik (Slika 6.2, b). LVDT merilnika sta imela možnost pomikov do 50mm. To je zadostovalo potrebam naših preizkusov.

6.9 Potek raziskave

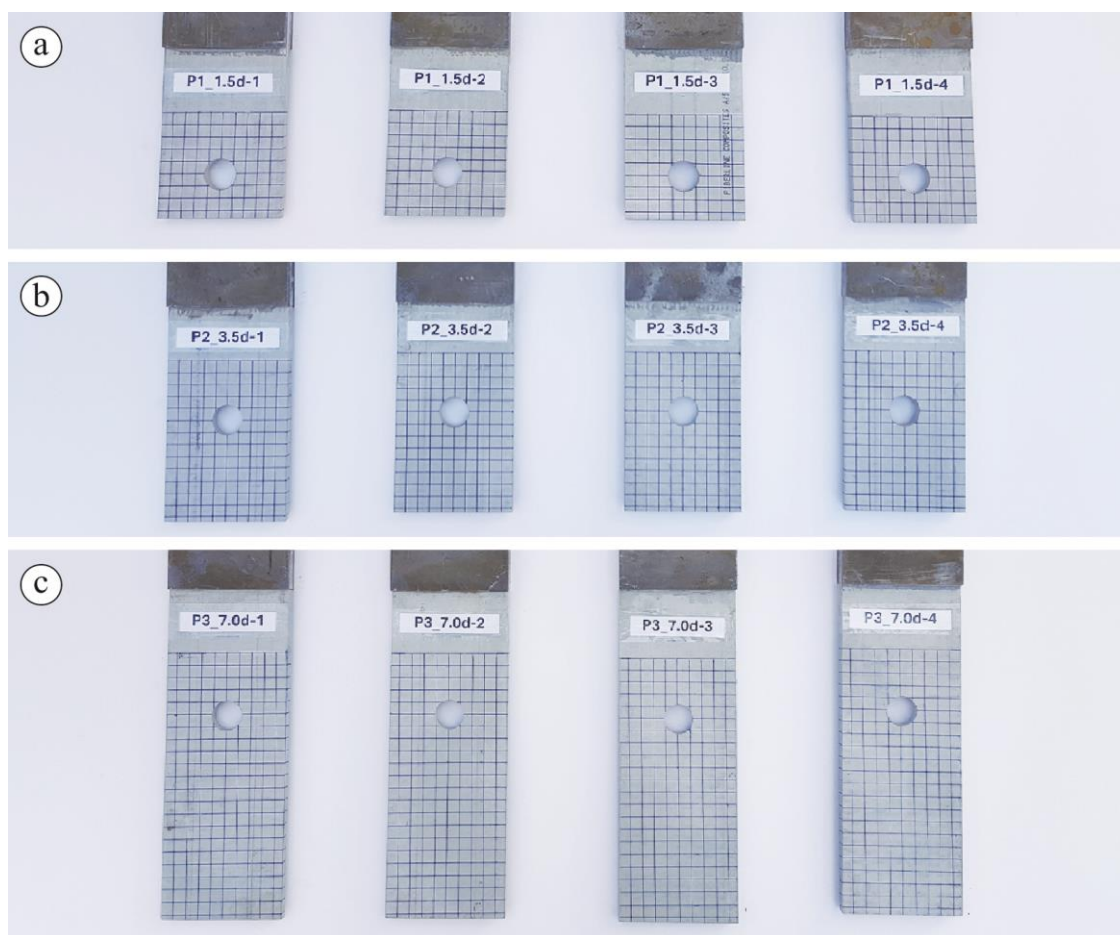
Pripravljalna dela so obsegala dimenzijski izris pločevine, armirane plastike v vektorskem risarskem programu AutoCAD (Slika 6.18 a). Jekleno pločevino sem na podlagi vektorskega izrisa izrezal na CNC laserskem rezalnem stroju (Slika 6.18 b), armirano plastiko pa na CNC vodnem rezalniku (Slika 6.18 c). Črna konstrukcijska pločevina je imela površino prekrito z kovinskim oksidom (Slika 6.18 d) in da bi pločevino lahko uporabil v lepljenem spoju sem jo moral jedkati (Slika 6.18 e). Površina armirane plastike je bila prevlečena z gladkim premazom, ki sem ga na grobo obrusil (Slika 6.18 f) z brusnim papirjem granulacije 40. Preizkušance sem potem zlepil z dvokomponentnim epoksi lepilom Sikadur 330 (Slika 6.18 g) jih obežil in pustil stati 7dni, da je lepilo lahko pridobilo svojo polno nosilnost. Preizkušancem sem potem narisal mrežo v velikosti 10*10 mm (Slika 6.18 h), da sem lahko po izvedenem preizkusu razločno videl deformirana območja in porušne linije.



Slika 6.18: Pripravljalna dela: a-vektorski izris v AutoCAD-u, b-laserski rezalni stroj, c-rezalnik z vodnim curkom, d-oksidirana pločevina, e-kadi za jedkanje, f-grobo obrušen laminat, g-lepilo Sikadur 330, h-izris mreže na preizkušancu.

Vsak spoj sem privijačil ročno ravno toliko, da vijak ni imel prevelike zračnosti. Preizkušavec sem s pomočjo vodne tehtnice niveliral v čeljusti naprave Instron. Namestil sem LVDT merilce na predhodno določena mesta (Slika 15). Po namestitvi in priklopu vseh naprav sem na računalniku resetiral vrednosti LVDT-jev, ter začel z obremenjevanjem spoja. Postopek sem ponovil 12 krat, 3 serije po 4 enake preizkušance.

Na sliki 6.19 je prikazanih vseh 12 preizkušancev iz armirane plastike. Razdeljeni so v 3 serije (P1, P2, P3) in vsaka serija ima 4 enake preizkušance. Serija P1 (Slika 6.19 a) ima središče luknje vijaka oddaljeno od roba profila, $a = 1,5*d = 1,5*24 \text{ mm} = 36 \text{ mm}$. Serija P2 (Slika 6.19 b) ima središče luknje vijaka oddaljeno od roba profila, $a = 3,5*d = 3,5*24 \text{ mm} = 84 \text{ mm}$. Serija P3 (Slika 6.19 c) ima središče luknje vijaka oddaljeno od roba profila, $a = 7,0*d = 7,0*24 \text{ mm} = 168 \text{ mm}$.



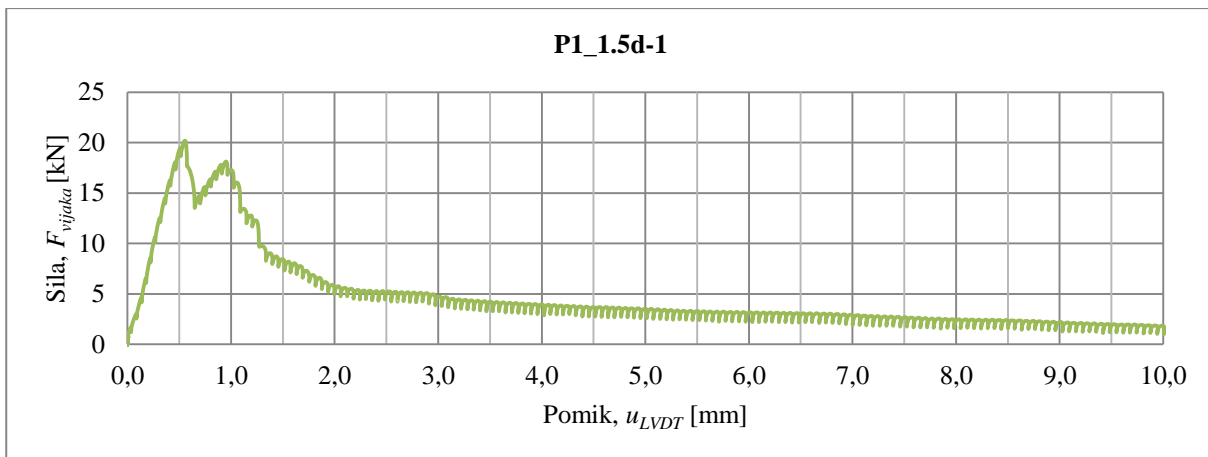
Slika 6.19: Serije preizkušancev: a-serija P1, b-serija P2, c-serija P3.

Rezultati laboratorijskega preizkusa so v nadaljevanju podani v obliki diagramov in njihovih opisov ter preglednice in njenega opisa. Za izris diagramov sem uporabil povprečje med izmerjenimi vrednostmi LVDT1 in LVDT2. Vrednosti pomikov izmerjene z merilno napravo v hidravličnem batu so bile vedno večje od izmerjenih vrednosti LVDT-jev. Do tega je prišlo zaradi podajnosti sistema.

7 REZULTATI PREIZKUSA

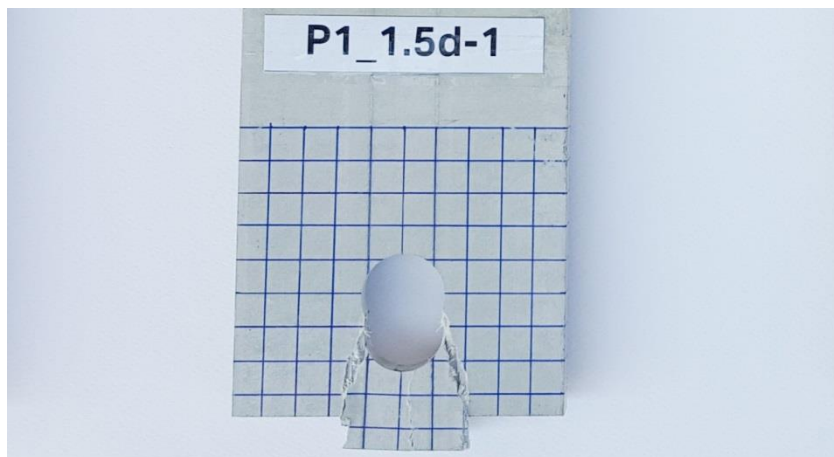
7.1 Rezultati posameznih preizkusov serije P1

Diagram na sliki 7.1 prikazuje, kako je sila v spoju linearno naraščala do 20,16 kN pri pomiku 0,56 mm, ko se je zgodila 1. poškodba materiala za preizkušane P1_1.5d-1. Sila je hipno padla na 13,52 kN pri pomiku 0,65 mm in v spoju je prišlo do ugnezdenja vijaka v material. Sila je zopet začela naraščati do 18,12 kN pri pomiku 0,95 mm in v spoju je prišlo do 2. poškodbe in dokončne porušitve materiala. Silo smo uvažali do pomika 10 mm, nato smo preizkus zaključili.



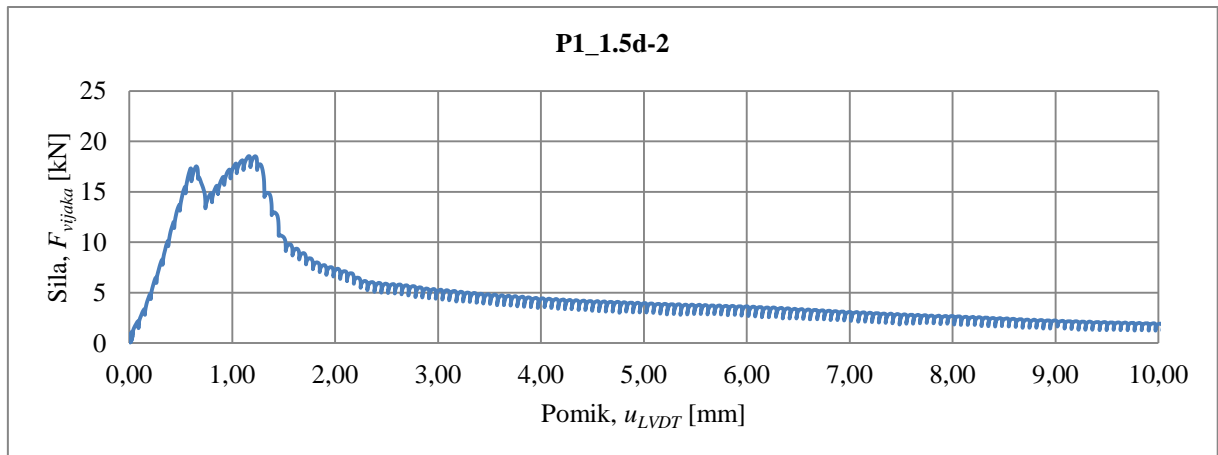
Slika 7.1: Diagram pomika in sile za preizkušane P1_1.5d-1.

Na sliki 7.2 je prikazana strižna porušitev spoja pred vijakom v vzdolžni smeri, 0° (strig). Do tega pride, ko napetost prekorači strižno trdnost materiala v vzdolžni smeri.



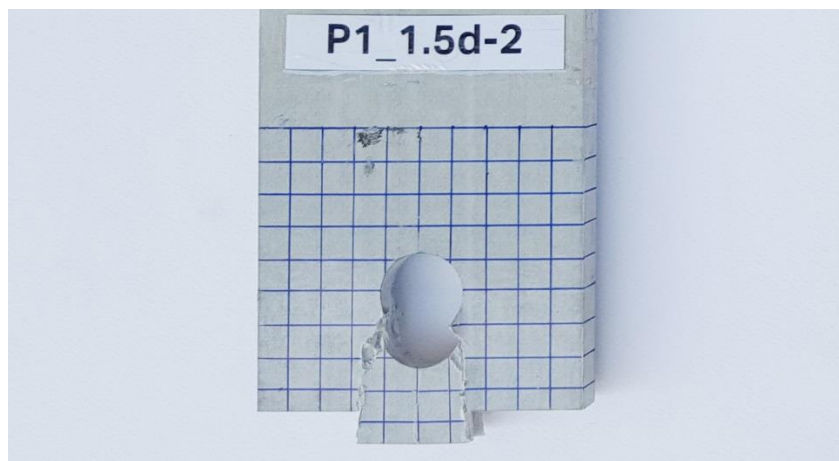
Slika 7.2: Deformiran preizkušane P1_1.5d-1. Strižna porušitev.

Diagram na sliki 7.3 prikazuje, kako je sila v spoju linearno naraščala do 17,52 kN pri pomiku 0,65 mm, ko se je zgodila 1. poškodba materiala za preizkušanec P1_1.5d-2. Sila je hipno padla na 13,36 kN pri pomiku 0,74 mm in v spoju je prišlo do ugnezdenja vijaka v material. Sila je zopet začela naraščati do 18,52 kN pri pomiku 1,17 mm, kjer je prišlo do 2. poškodbe in dokončne porušitve materiala. Silo smo uvajali do pomika 10 mm, nato smo preizkus zaključili.



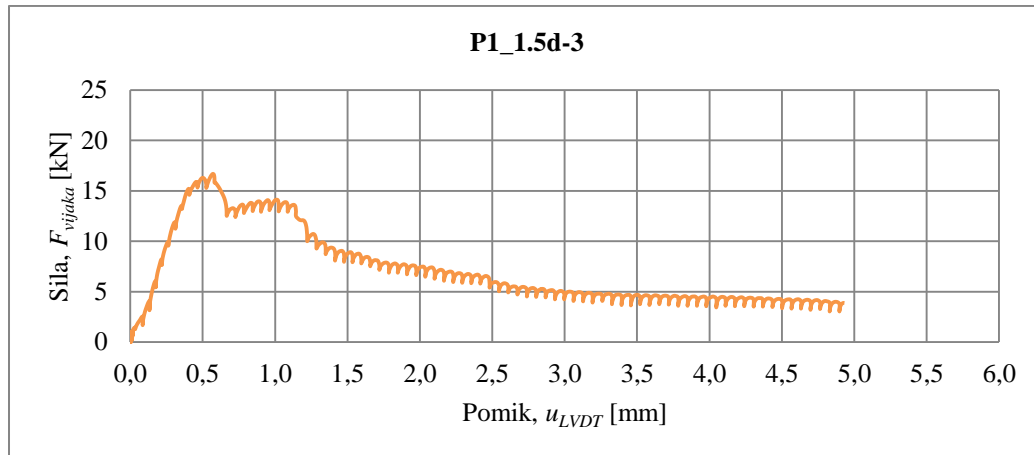
Slika 7.3: Diagram pomika in sile za preizkušanec P1_1.5d-2.

Na sliki 7.4 je prikazana strižna porušitev spoja pred vijakom v vzdolžni smeri, 0° (strig). Do tega pride, ko napetost prekorači strižno trdnost materiala v vzdolžni smeri.



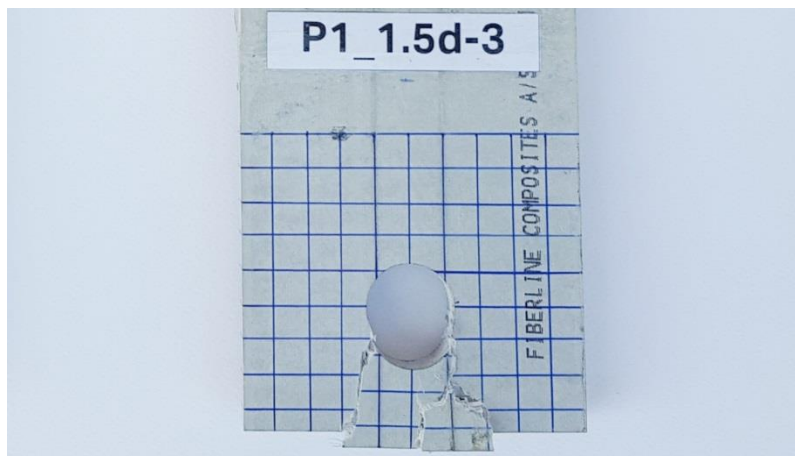
Slika 7.4: Deformiran preizkušanec P1_1.5d-2. Strižna porušitev.

Diagram na sliki 7.5 prikazuje, kako je sila v spoju linearno naraščala do 16,68 kN pri pomiku 0,57 mm, ko se je zgodila 1. poškodba materiala za preizkušanec P1_1.5d-3. Sila je hipno padla na 12,52 kN pri pomiku 0,67 mm in v spoju je prišlo do ugnezdjenja vijaka v material. Sila je zopet začela naraščati do 14,12 kN pri pomiku 1,01 mm in v spoju je prišlo do 2. poškodbe in dokončne porušitve materiala. Silo smo uvajali do pomika 5 mm, nato smo preizkus zaključili.



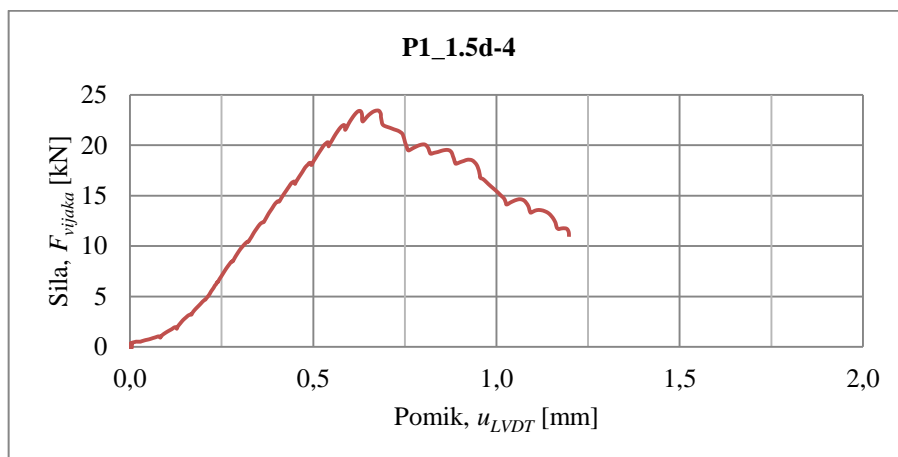
Slika 7.5: Diagram pomika in sile za preizkušanec P1_1.5d-3.

Na sliki 7.6 je prikazana strižna porušitev spoja pred vijakom v vzdolžni smeri, 0° (strig). Do tega pride, ko napetost prekorači strižno trdnost materiala v vzdolžni smeri.



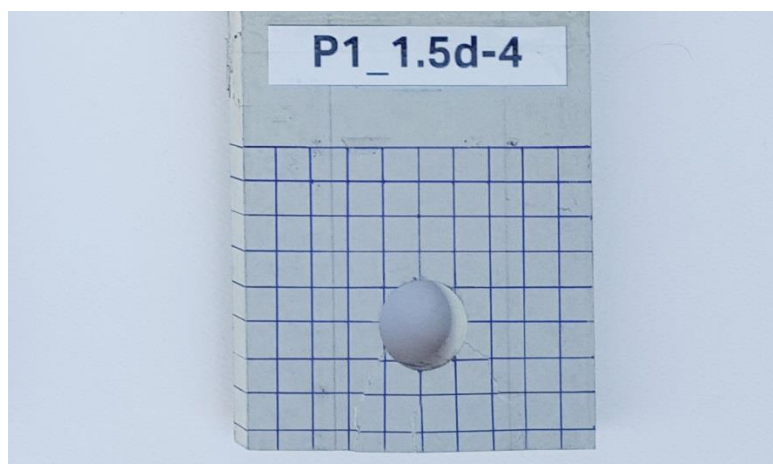
Slika 7.6: Deformiran preizkušanec P1_1.5d-3. Strižna porušitev.

Diagram na sliki 7.7 prikazuje kako je sila v spoju linearno naraščala do 23,44 kN in pomika 0,81 mm, ko se je zgodila 1. poškodba materiala za preizkušane P1_1.5d-4. Sila je hipno padla. Ob padcu sile za več kot 20% smo preizkus zaključili, da bi si lahko na preizkušancu ogledali 1. poškodbo materiala.



Slika 7.7: Diagram pomika in sile za preizkušane P1_1.5d-4.

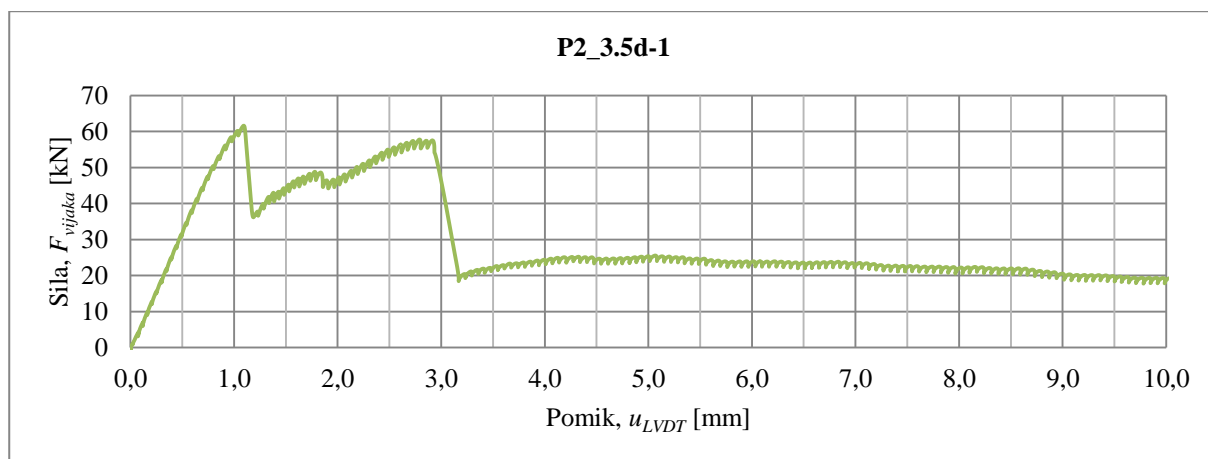
Na sliki 7.8 je prikazana 1. poškodba materiala, ki se zgodi. Luknja ovalizira (ugnezdenje vijaka) zaradi lokalne prekoračitve strižne nosilnosti kompozitnega preizkušanca ob straneh kontakta z vijakom v vzdolžni smeri oz. smeri obremenjevanja, 0° (strig).



Slika 7.8: Deformiran preizkušane P1_1.5d-4. Lokalna strižna porušitev.

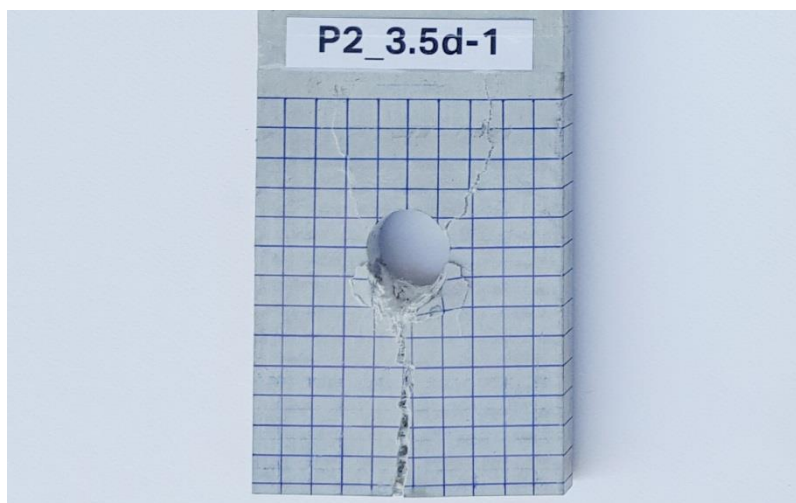
7.2 Rezultati posameznih preizkusov serije P2

Diagram na sliki 7.9 prikazuje, kako je sila v spoju linearno naraščala do 61,60 kN pri pomiku 1,09 mm, ko se je zgodila 1. poškodba materiala za preizkušane P2_3.5d-1. Sila je hipno padla na 36,16 kN pri pomiku 1,19 mm in v spoju je prišlo do ugnezdenja vijaka v material. Sila je zopet začela naraščati do 57,16 kN pri pomiku 2,84 mm in v spoju je prišlo do 2. poškodbe in dokončne porušitve materiala. Silo smo uvažali do pomika 10 mm, nato smo preizkus zaključili.



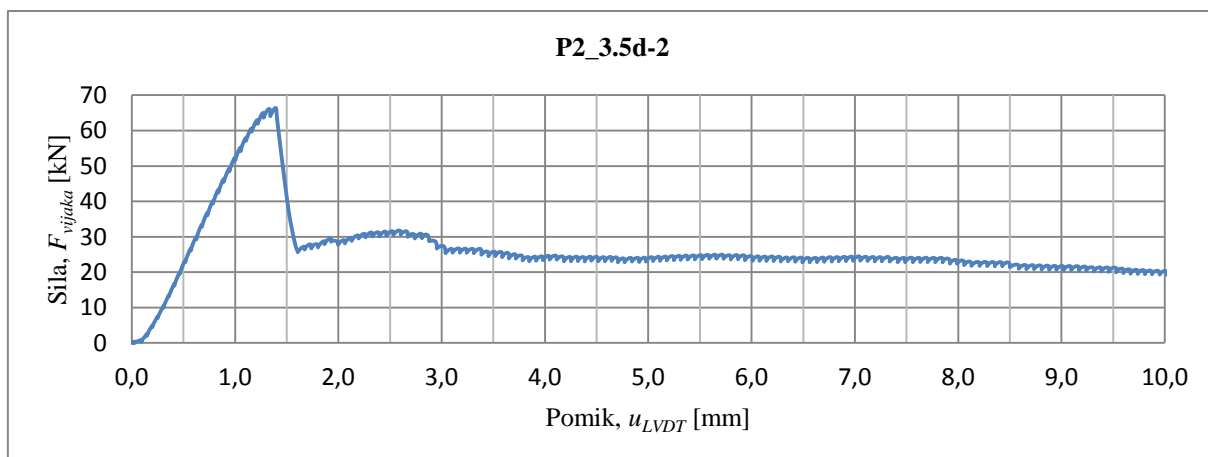
Slika 7.9: Diagram pomika in sile za preizkušane P2_3.5d-1.

Na sliki 7.10 je prikazana cepilna porušitev pred vijakom v vzdolžni smeri, 0°. Do tega pride, ko napetost prekorači natezno trdnost vlaken v prečni smeri preizkušanca (90°).



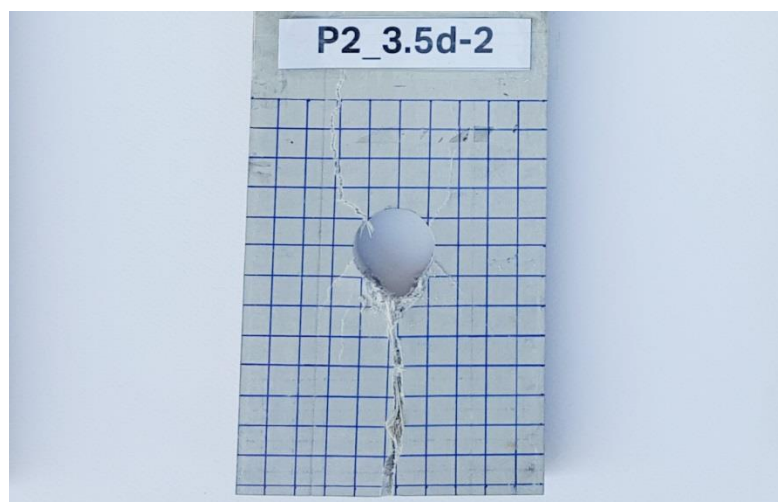
Slika 7.10: Deformiran preizkušane P2_3.5d-1. Cepilna porušitev.

Diagram na sliki 7.11 prikazuje, kako je sila v spoju linearno naraščala do 66,40 kN pri pomiku 1,39 mm, ko se je zgodila 1. poškodba materiala za preizkušane P2_3.5d-2. Sila je hipno padla na 25,68 kN pri pomiku 1,61 mm in v spoju je prišlo do ugnezdjenja vijaka v material. Sila je začela naraščati do 31,76 kN pri pomiku 2,59 mm, kjer je prišlo do 2. poškodbe in dokončne porušitve materiala. Silo smo uvajali do pomika 10 mm, nato smo preizkus zaključili.



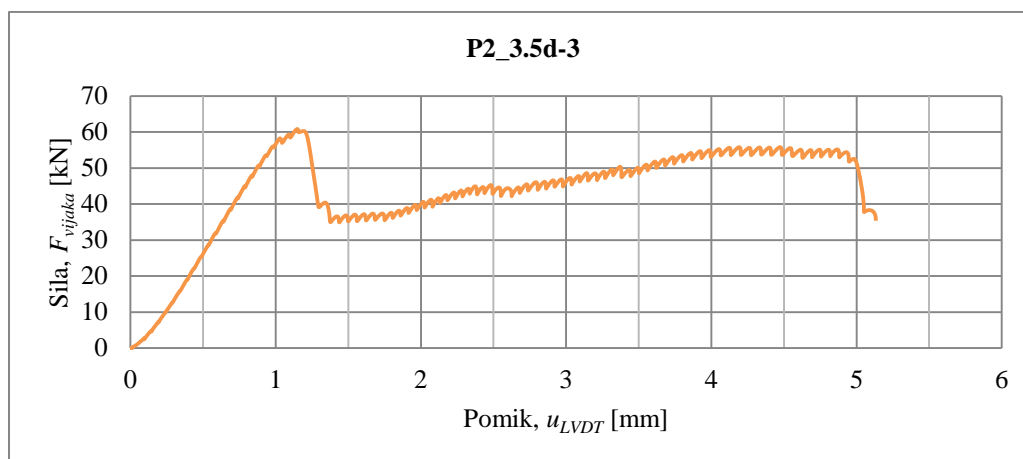
Slika 7.11: Diagram pomika in sile za preizkušane P2_3.5d-2.

Na sliki 7.12 je prikazana cepilna porušitev pred vijakom v vzdolžni smeri, 0°. Do tega pride, ko napetost prekorači natezno trdnost vlaken v prečni smeri, 90°.



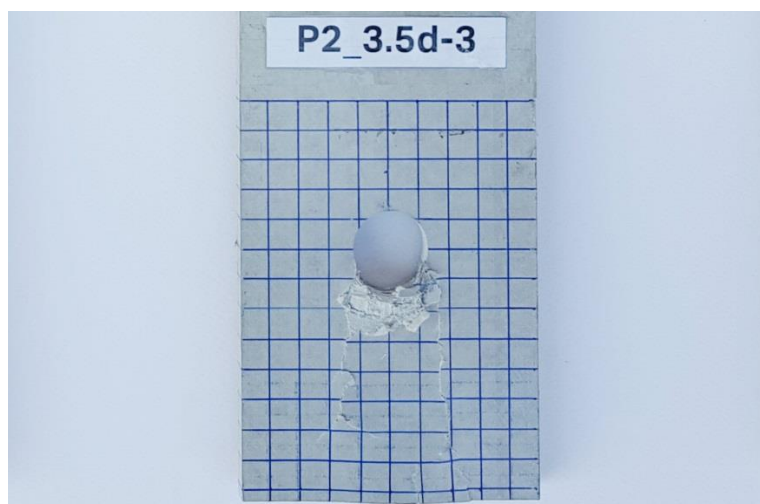
Slika 7.12: Deformiran preizkušane P2_3.5d-2. Cepilna porušitev.

Diagram na sliki 7.13 prikazuje, kako je sila v spoju linearno naraščala do 60,80 kN pri pomiku 1,15 mm, ko se je zgodila 1. poškodba materiala za preizkušane P2_3.5d-3. Sila je hipno padla na 34,96 kN pri pomiku 1,38 mm in v spoju je prišlo do ugnezdjenja vijaka v material. Sila je zopet začela naraščati do 55,08 kN pri pomiku 4,75 mm in v spoju je prišlo do 2. poškodbe in dokončne porušitve materiala. Silo smo uvajali do pomika 5 mm, nato smo preizkus zaključili.



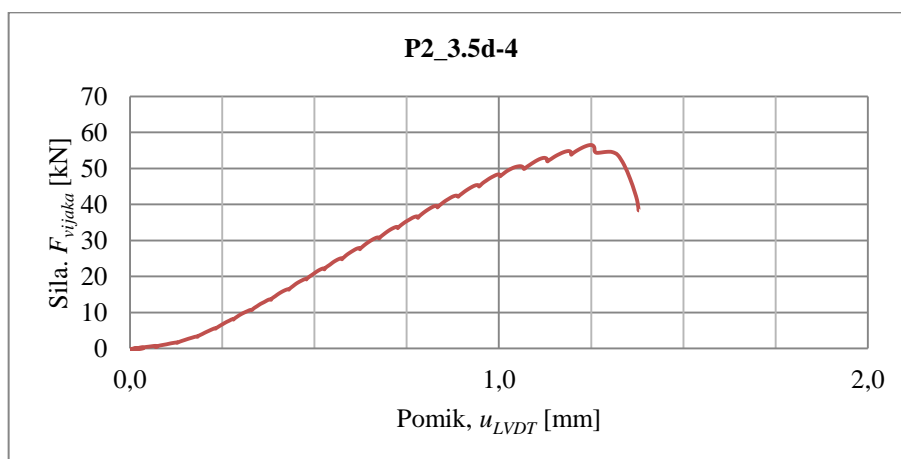
Slika 7.13: Diagram pomika in sile za preizkušane P2_3.5d-3.

Na sliki 7.14 je prikazana strižna porušitev spoja pred vijakom v vzdolžni smeri, 0° (strig). Do tega pride, ko napetost prekorači strižno trdnost materiala v vzdolžni smeri.



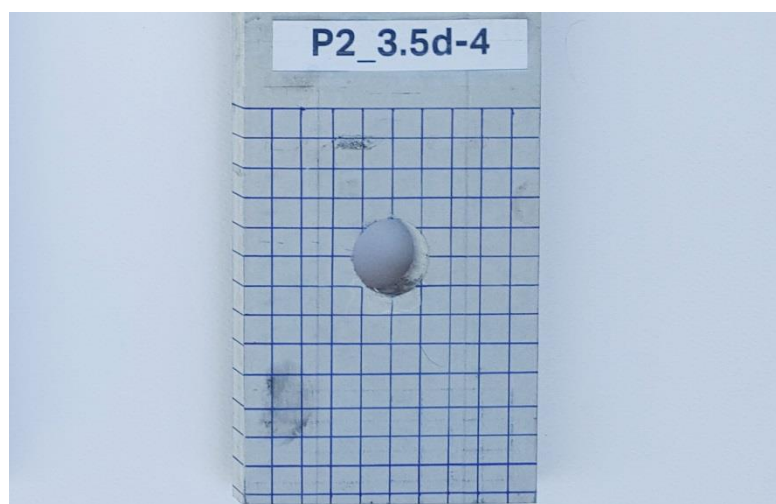
Slika 7.14: Deformiran preizkušane P2_3.5d-3. Strižna porušitev.

Diagram na sliki 7.15 prikazuje, kako je sila v spoju linearno naraščala do 56,48 kN in pomika 1,25 mm, ko se je zgodila 1. poškodba materiala za preizkušane P2_3.5d-4. Sila je hipno padla. Ob padcu sile za več kot 20% smo preizkus zaključili, da bi si lahko na preizkušancu ogledali 1. poškodbo materiala.



Slika 7.15: Diagram pomika in sile za preizkušane P2_3.5d-4.

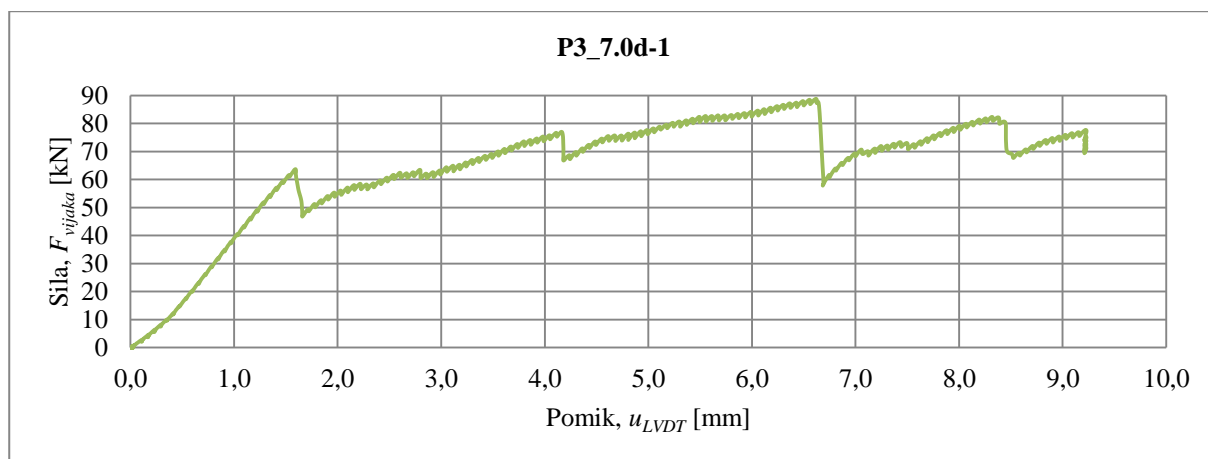
Na sliki 7.16 je prikazana 1. poškodba materiala, ki se zgodi. Luknja ovalizira (ugnezdenje vijaka) zaradi lokalne prekoračitve strižne nosilnosti kompozitnega preizkušanca ob straneh kontakta z vijakom v vzdolžni smeri oz. smeri obremenjevanja, 0° (strig).



Slika 7.16: Deformiran preizkušane P2_3.5d-4. Lokalna strižna porušitev..

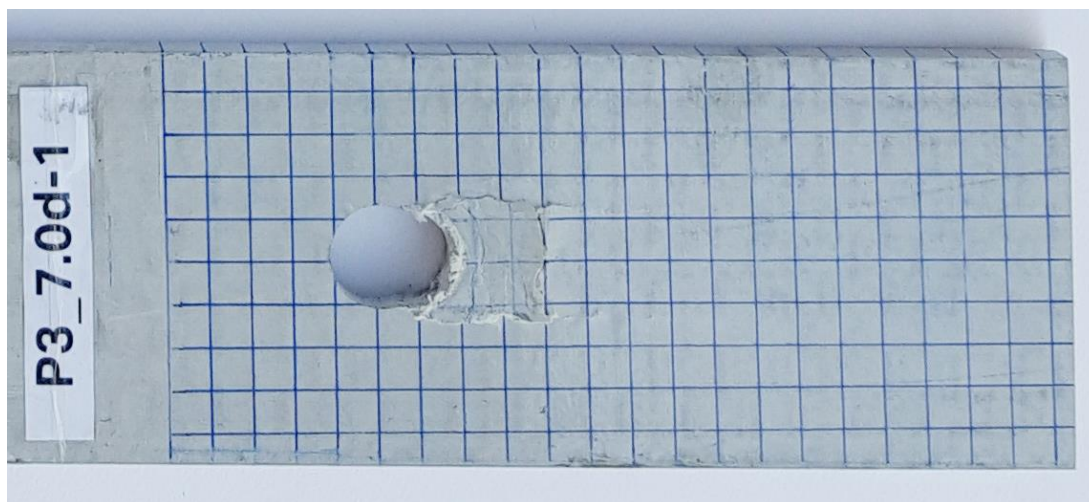
7.3 Rezultati posameznih preizkusov serije P3

Diagram na sliki 7.17 prikazuje, kako je sila v spoju linearno naraščala do 63,68 kN pri pomiku 1,38 mm, ko se je zgodila 1. poškodba materiala za preizkušane P3_7.0d-1. Sila je hipno padla na 46,76 kN pri pomiku 1,54 mm in v spoju je prišlo do ugnezdenja vijaka v material. Sila je zopet začela naraščati do 87,92 kN pri pomiku 6,52 mm in v spoju je prišlo do 2. poškodbe in dokončne porušitve materiala. Silo smo uvažali do pomika 10 mm, nato smo preizkus zaključili.



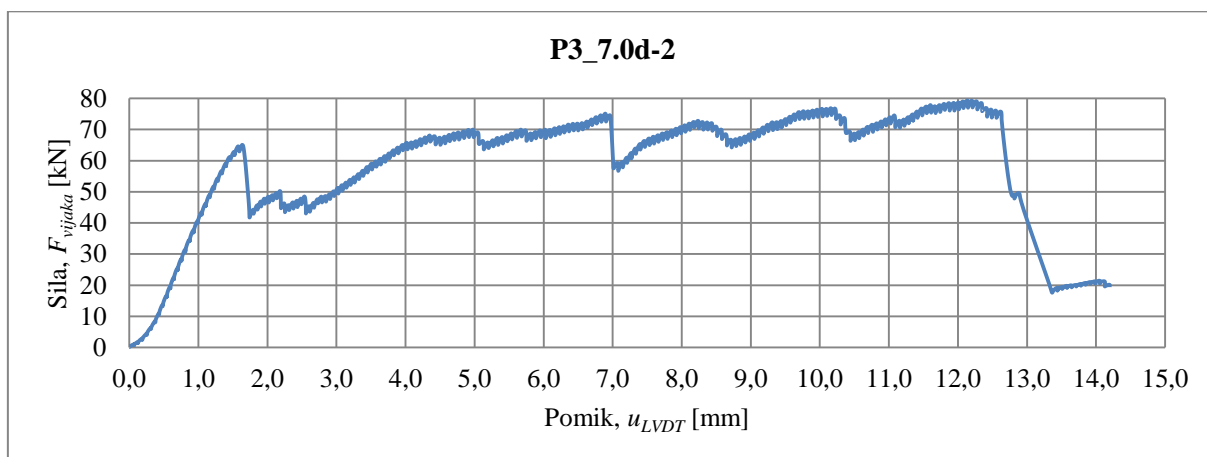
Slika 7.17: Diagram pomika in sile za preizkušane P3_7.0d-1.

Na sliki 7.18 je prikazana strižna porušitev spoja pred vijakom v vzdolžni smeri, 0° (strig). Do tega pride, ko napetost prekorači strižno trdnost materiala v vzdolžni smeri.



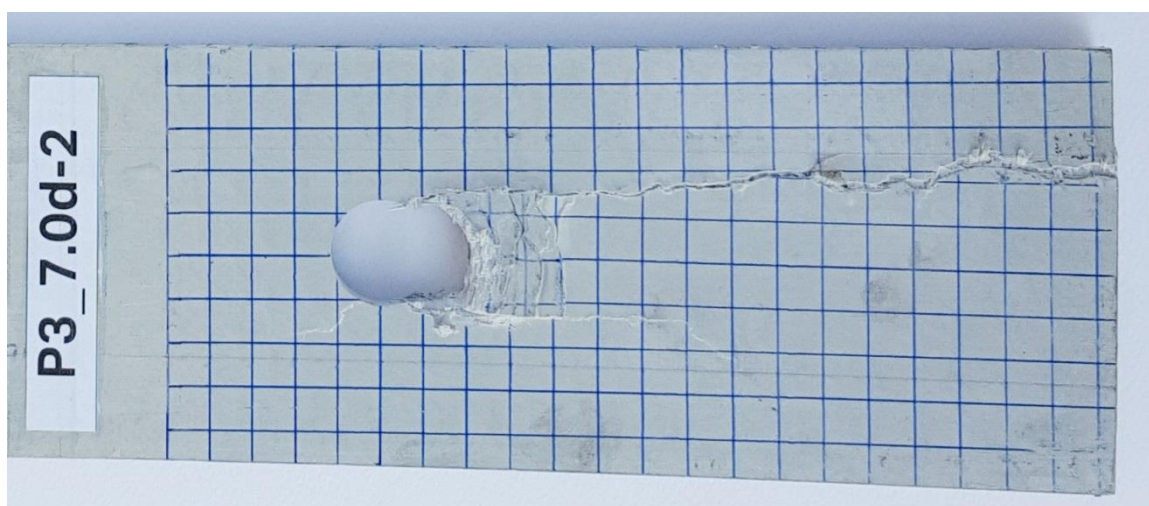
Slika 7.18: Deformiran preizkušane P3_7.0d-1. Strižna porušitev.

Diagram na sliki 7.19 prikazuje, kako je sila v spoju linearno naraščala do 61,16 kN pri pomiku 1,45 mm, ko se je zgodila 1. poškodba materiala za preizkušane P3_7.0d-2. Sila je hipno padla na 41,76 kN pri pomiku 1,74 mm in v spoju je prišlo do ugnezdenja vijaka v material. Sila je zopet začela naraščati do 76,12 kN pri pomiku 12,55 mm in v spoju je prišlo do 2. poškodbe in dokončne porušitve materiala. Silo smo uvajali do pomika 15 mm, nato smo preizkus zaključili.



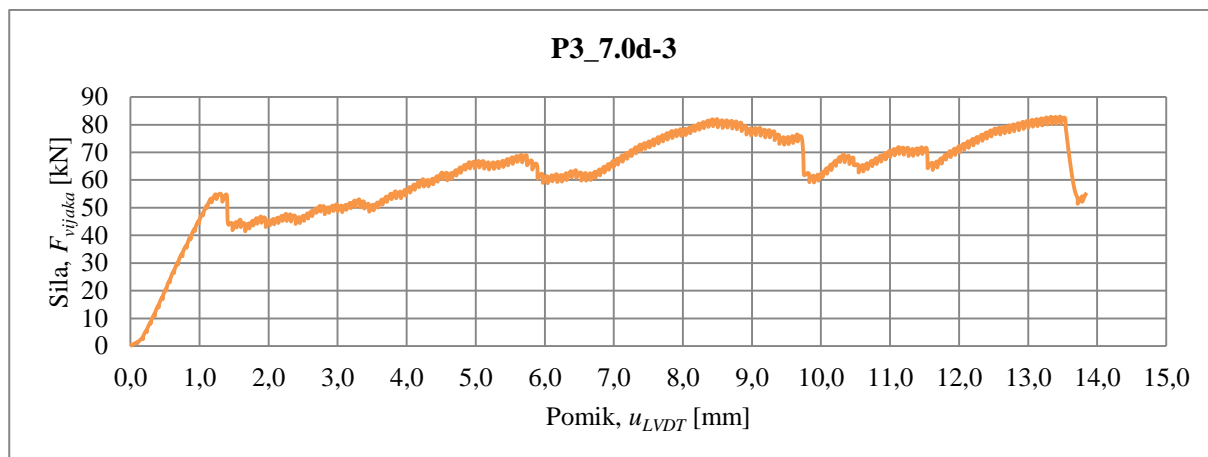
Slika 7.19: Diagram pomika in sile za preizkušane P3_7.0d-2.

Na sliki 7.20 je prikazana strižna porušitev spoja pred vijakom v vzdolžni smeri, 0° (strig). Do tega pride, ko napetost prekorači strižno trdnost materiala v vzdolžni smeri.



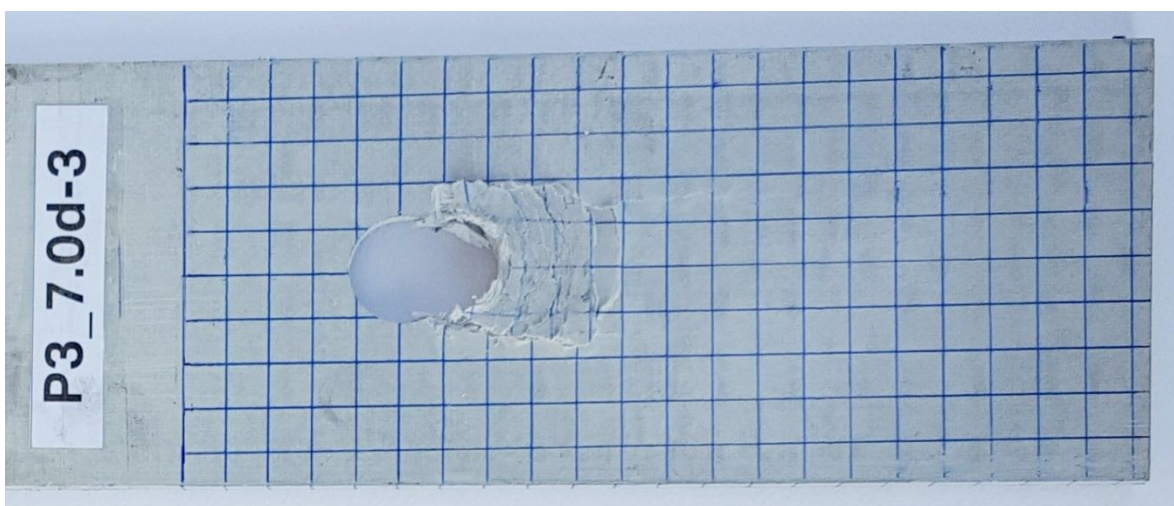
Slika 7.20: Deformiran preizkušane P3_7.0d-2. Strižna porušitev.

Diagram na sliki 7.21 prikazuje kako je sila v spoju linearno naraščala do 54,84 kN pri pomiku 1,24 mm, ko se je zgodila 1. porušitev materiala za preizkušancev P1_7.0d-3. Sila je hipno padla na 41,76 kN pri pomiku 1,74 mm in v spoju je prišlo do ugnezdenja vijaka v material. Sila je zopet začela naraščati do 82,88 kN pri pomiku 13,47 mm in v spoju je prišlo do 2. poškodbe in dokončne porušitve materiala. Silo smo uvajali do pomika 15 mm, nato smo preizkus zaključili.



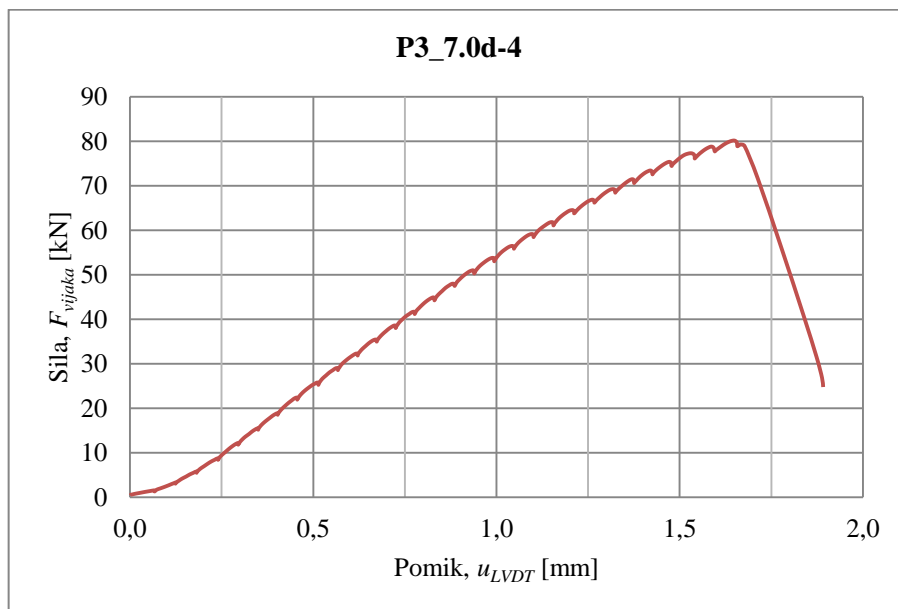
Slika 7.21: Diagram pomika in sile za preizkušane P3_7.0d-3.

Na sliki 7.22 je prikazana strižna porušitev spoja pred vijakom v vzdolžni smeri, 0° (strig). Do tega pride, ko napetost prekorači strižno trdnost materiala v vzdolžni smeri.



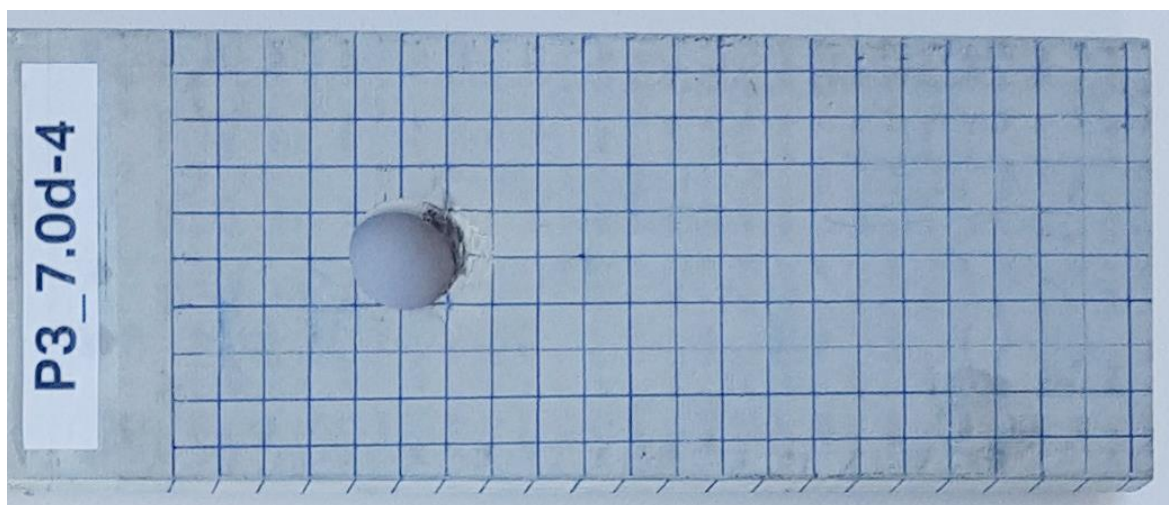
Slika 7.22: Deformiran preizkušane P3_7.0d-3. Strižna porušitev.

Diagram na sliki 7.23 prikazuje, kako je sila v spoju linearno naraščala do 80,16 kN in pomika 1,65 mm, ko se je zgodila 1. poškodba materiala za preizkušane P3_7.0d-4. Sila je hipno padla. Ob padcu sile za več kot 20% smo preizkus zaključili, da bi si lahko na preizkušancu ogledali 1. poškodbo materiala.



Slika 7.23: Diagram pomika in sile za preizkušane P3_7.0d-4

Na sliki 7.24 je prikazana 1. poškodba materiala, ki se zgodi. Luknja ovalizira (ugnezdenje vijaka) zaradi lokalne prekoračitve strižne nosilnosti kompozitnega preizkušanca ob straneh kontakta z vijakom v vzdolžni smeri oz. smeri obremenjevanja, 0° (strig).



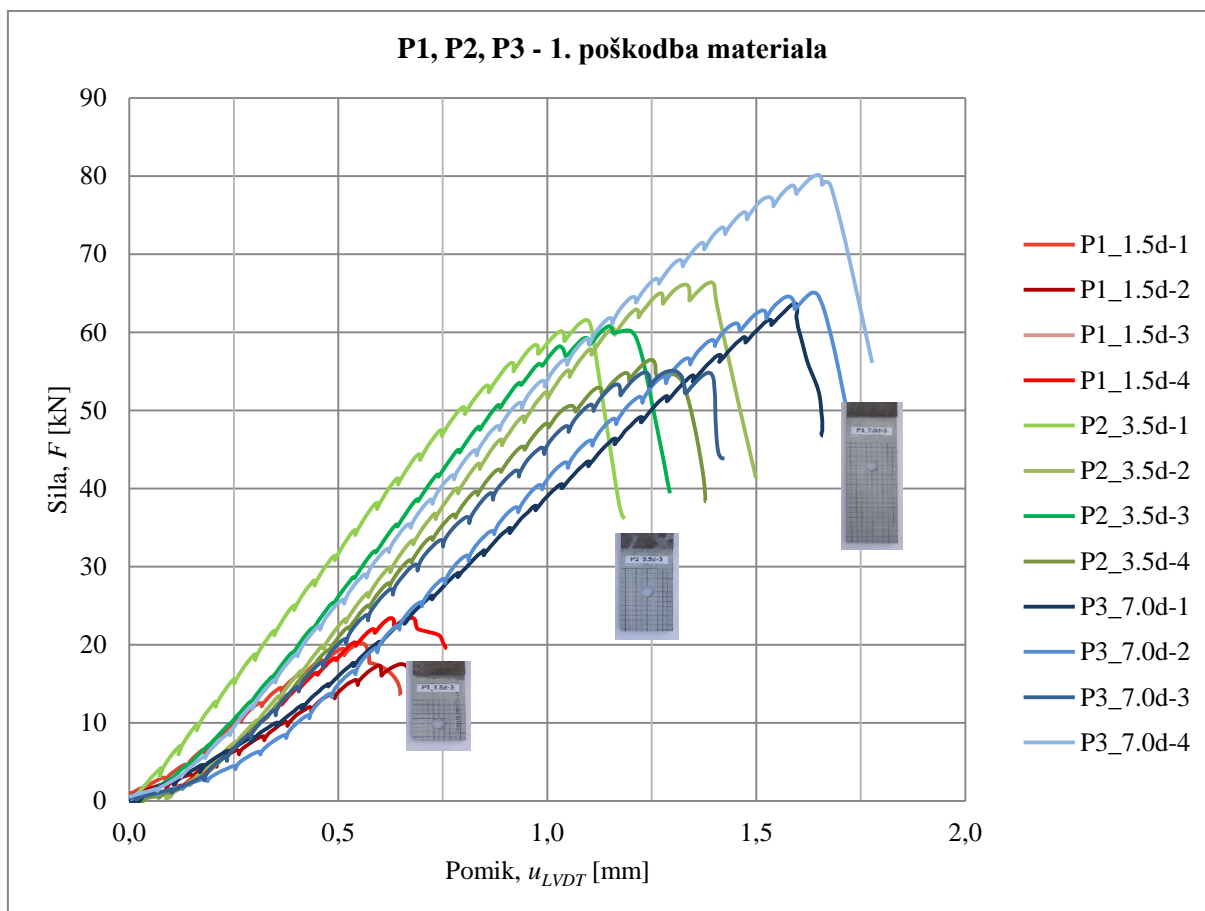
Slika 7.24: Deformiran preizkušane P3_7.0d-4. Lokalna strižna porušitev.

Spoji z razdaljo $1,5*d$ imajo vsi strižno porušitev na vlakna pred vijakom v vzdolžni smeri, spoji z razdaljo $3,5*d$ imajo v dveh primerih cepilno porušitev spoja pred vijakom v vzdolžni smeri in v dveh primerih strižno porušitev pred vijakom v vzdolžni smeri. Spoji z razdaljo $7,0*d$ imajo v vseh primerih strižno porušitev pred vijakom v vzdolžni smeri. Največ porušitev je strižnih pred vijakom v vzdolžni smeri. Vsi spoji so imeli porušitve krhkega loma pri doseženi prvi poškodbi. Pri spoju z razdaljo $1,5*d$ je nastanek prve poškodbe pomenil tudi maksimalno nosilnost, nato pa je spoj praktično popolnoma popustil in izkazal zanemarljivo nosilnost. Preostali dve varianti z razdaljo $3,5*d$ in $7,0*d$ po nastanku prve poškodbe izkazujejo določeno stopnjo rezidualne nosilnosti, še posebej pri preizkušancu z največjo razdaljo, kjer je nosilnost primerljiva z začetno pri relativno velikih pomikih.

7.4 Diagram sila-pomik pri 1. poškodbi materiala spojev P1, P2, P3

Diagram na sliki 7.25 prikazuje primerjavo zabeleženih odnosov med silo in pomikom od začetka obremenjevanja, do nastanka prvih poškodb kompozitnega preizkušanca. Očitno je, da pri manjših pomikih (do približno 2,5 mm) preizkušani spoji izkazujejo nekoliko manjšo togost, kar je predvsem posledica izgub zaradi začetnega naleganja vijaka na luknjo preizkušanca. Vsi preizkušani spoji se po doseženem popolnem naleganju vijaka na luknjo kompozitne plošče obnašajo linearno skoraj do nastanka prve poškodbe, kateri sledi hipen padec sile in s tem tudi togosti.

Iz diagrama je razvidno tudi, da imajo spoji P1 približno trikrat manjšo nosilnost pri pojavu prve poškodbe v primerjavi s spoji P2 in P3. Nosilnost spoja pri P1 se giblje med 16 kN in 24 kN, medtem ko se nosilnost spoja pri P2 in P3 giblje med 54 kN in 80 kN. Iz diagrama je razvidno, da so pomiki za vse preizkušance majhni in se gibljejo med 0,5 mm in 1,7 mm. To samo potrjuje, da se je ob 1. poškodbi pri vseh spojih (P1, P2, P3) zgodil krhek lom.



Slika 7.25: Diagram pomika in sile za serijo preizkušancev P1, P2, P3 – 1. poškodba.

7.5 Nosilnost spojev

V preglednici 7.1 sem zajel vse maksimalne nosilnosti ob 1. poškodbi materiala, maksimalne nosilnosti ob poružitvi, pripadajoče pomike, načine 1. poškodb in načine končnih porušitev spoja, ki smo jih registrirali z laboratoriju. Iz rezultatov je razvidno, da spoji P1 z najkrajšo razdaljo ($a = 1,5*d$) od središča vijaka do roba kompozita nimajo velike nosilnosti. Nosilnost takih spojev je ob 1. poškodbi trikrat manjša kot pri spojih z daljšo razdaljo (a) in izkazuje izrazito ter pričakovano krhko porušitev. Spoj se praktično takoj po 1. poškodbi tudi vedno strižno poruši. V spojih P2 z oddaljenostjo $3,5*d$ se 1. poškodba v obliki ovalizacije luknje zgodi pri večjih silah, med 55 kN in 67 kN.

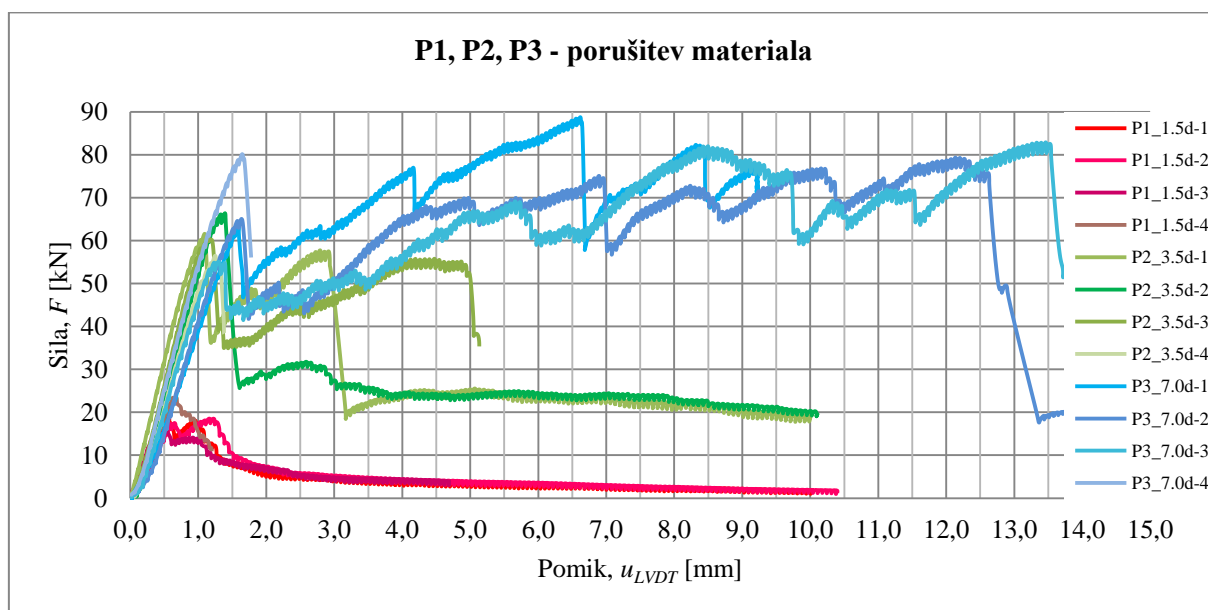
Preglednica 7.1: Nosilnosti spojev s 1. poškodbami, poružitvami in pripadajočimi pomiki

Oznaka preiz.	a [mm]	d [mm]	b/t [mm]	$F_{vijaka,1}$ [kN]	uI [mm]	Način prve poškodbe	$F_{vijaka,p}$ [kN]	uP [mm]	Način končne poružitve
P1-1.5d-1	36	24	100/10	20,16	0,56	ovalizacija luknje	18,12	0,95	strižna poružitve
P1-1.5d-2	36	24	100/10	17,52	0,65	ovalizacija luknje	18,52	1,17	strižna poružitve
P1-1.5d-3	36	24	100/10	16,68	0,57	ovalizacija luknje	14,12	1,01	strižna poružitve
P1-1.5d-4	36	24	100/10	23,44	0,81	ovalizacija luknje	preizkus smo zaključili ob 1. večjem padcu sile		
P2_3.5d-1	86	24	100/10	61,60	1,09	ovalizacija luknje	57,16	2,84	cepilna poružitve
P2_3.5d-2	86	24	100/10	66,40	1,38	ovalizacija luknje	31,76	2,59	cepilna poružitve
P2_3.5d-3	86	24	100/10	60,80	1,15	ovalizacija luknje	55,08	4,75	strižna poružitve
P2_3.5d-4	86	24	100/10	56,48	1,25	ovalizacija luknje	preizkus smo zaključili ob 1. večjem padcu sile		
P3_7.0d-1	168	24	100/10	63,68	1,38	ovalizacija luknje	87,92	6,52	strižna poružitve
P3_7.0d-2	168	24	100/10	61,16	1,45	ovalizacija luknje	76,12	12,55	strižna poružitve
P3_7.0d-3	168	24	100/10	54,84	1,24	ovalizacija luknje	82,88	13,47	strižna poružitve
P3_7.0d-4	168	24	100/10	80,16	1,65	ovalizacija luknje	pPreizkus smo zaključili ob 1. večjem padcu sile		

Legenda oznak:

- a —oddaljenost središča luknje od roba,
- d —premer vijaka,
- b/t —širina in debelina laminata,
- $F_{vijaka,1}$ —sila vijaka pri 1.registraciji večjega padca sile (1. poškodba),
- uI —pomiki pri 1. registraciji večjega padca sile (1. poškodba),
- $F_{vijaka,p}$ —maksimalna sila ob dokončni poružitvi spoja,
- uP —pomik pri dokončni poružitvi spoja.

Na sliki 7.26 je prikazana primerjava obnašanja spojev tudi pri večjih pomikih po nastanku prvih poškodb kompozitne plošče. Z rdečo barvo so prikazani rezultati za preizkušance z najkrajšo razdaljo centra luknje od zunanje roba kompozitne plošče. Z zeleno barvo so prikazani rezultati za preizkušance s srednjo velikostjo oddaljenosti in z modro barvo so prikazani rezultati za preizkušance za največjo oddaljenostjo središča luknje od zunanje roba kompozitne plošče. Očitno je, da spoji z najmanjšo oddaljenostjo središča luknje od zunanje roba izkazujejo zanemarljivo nosilnost pri večjih pomikih po nastanku prve poškodbe, kar v praksi pomeni, da nimamo nobene rezerve nosilnosti. Medtem, po drugi strani preizkušane z največjo oddaljenostjo centra luknje od roba izkazuje tudi pri zelo velikih pomikih na določenih odsekih celo večjo nosilnost kot pri nastanku prve poškodbe. Z uporabo takšnega spoja v praksi lahko računamo na dodatno nosilnost in varnost tudi po tem, ko so na kompozitni plošči že vidne prve poškodbe. Takšen spoj izkazuje v končni fazi tudi določeno stopnjo duktilnosti in tudi sposobnost disipacije energije. Z ozirom na spoj s srednjo oddaljenostjo luknje od roba kompozitne plošče (zeleno barva) opazimo, da takšen spoj izkazuje določeno rezervo pred popolno porušitvijo, pa vendar po amplitudi pomika 1,5 mm nosilnost pade na približno 20 kN kar je približno 30% nosilnosti pri nastanku prve poškodbe. Poleg tega je porušni mehanizem, kateri poteka vzdolž sredine kompozitne plošče (slika 7.12) po celotni dolžini od luknje do roba kompozitne plošče zelo neugoden, saj predstavlja tveganje za hipno dokončno porušitev. Iz obravnavanih in prikazanih rezultatov lahko sklepamo, da je pri spojih za konstrukcijske namene, kjer potrebujemo dodano nosilnost in rezervo z duktilnim obnašanjem, nujno potrebno uporabiti spoje z najdaljšimi oddaljenostmi lukenj ($a_{min}=3,5*d$) od zunanje roba kompozitne plošče.



Slika 7.26: Diagram pomika in sile za serijo preizkušancev P1, P2, P3 – porušitev materiala

8 ZAKLJUČEK

Na začetku diplomske naloge je predstavitev osnovnih sestavnih delov armiranih plastik (vlakna, matrice, polnila, aditivi) za konstrukcijske namene in opis njenih materialnih lastnosti za potrebe lažjega razumevanja v nadaljevanju. Prednosti armiranih plastik pred konvencionalnimi materiali so v tem, da imajo odlično razmerje med nosilnostjo in lastno težo, so korozijsko obstojni in imajo dobro odpornost na utrujanje, medtem ko so imajo elastične in strižne module nekoliko nižje.

Raziskal in opisal sem proizvodne postopke za proizvodnjo armiranih plastik za potrebe gradbeništva. Za najbolj primeren postopek izdelave se je izkazala pultruzija. S tem postopkom se lahko kontrolirano izvede kontinuiran konstantni prerez (profil), ki ima konstantne lastnosti materiala po celotnem prerezu, hkrati pa nam omogoča zagotavljanje materiala z enakimi lastnostmi.

Pregledal sem tudi kakšni so standardi in smernice za načrtovanje armiranih plastik. Edini evropski obstoječ standard, kateri obravnava minimalne zahteve za GFRP pultruzijske profile, je EN 13706 [19], [20], [21]. Standard določa minimalne zahteve za kakovost, tolerance, trdnost, togost in površino konstrukcijskih profilov, medtem ko še vedno ni enotnih in splošno sprejetih smernic za projektiranje GFRP konstrukcij. Obstajata dva splošna priročnika za dimenzioniranje za gradbene inženirje: Structural Plastic Design manual [18] in Eurocomp Design Code and Handbook [12]. Glede na to, da ni soglasja o vrednostih varnostnih faktorjev v teh dveh priročnikih, jih ne moremo obravnavati kot zavezujoče in referenčne dokumente pri projektiranju.

V konstrukcijskih spojih se uporabljajo tri vrste spojev: lepljeni spoj (lepljeno), mehanski vijačen spoj in kombiniran spoj (lepljen in hkrati vijačen spoj). Konstrukcijske profile iz armirane plastike je zelo težko mehansko spajati zaradi krhke vlaknaste in anizotropne lastnosti samega materiala. Kljub temu so najbolj v uporabi predvsem zaradi enostavnosti izvedbe, možnosti demontaže, enostavnejše kontrole in kvazi-duktilnega obnašanja. V mehanskem spoju se obremenitve med elementi prenašajo preko stebela vijaka in preklopnih kompozitnih elementov. Spoji zagotavljajo prenos nateznih in tlačnih obremenitev. Steblo vijaka in kompozitni elementi imajo v spoju majhno kontaktno površino zato pri natezni obremenitvi nastanejo veliki bočni pritiski, ki v kompozitnih elementih povzročijo koncentracije napetosti.

V nadaljevanju sem izvedel laboratorijske preizkuse vijačenih spojev z enim vijakom in opazoval bočni pritisk vijaka na armirano plastiko za tri različne variante oddaljenosti luknje vijaka od obremenjenega roba armirane plastike. S preizkusi sem določil mejno nosilnost in opazoval porušne mehanizme, ki se zgodijo v nategu. Na osnovi priporočil v fiberlinovem priročniku za dimenzioniranje, ki temeljijo na Eurocomp Design Code and Handbook sem za preizkušance

pravokotnega prereza določil tri različne razdalje središča luknje vijaka od zunanjega obremenjenega roba kompozitne plošče v odvisnosti od premera spojnega vijaka ($1,5*d$; $3,5*d$; $7*d$).

Na osnovi eksperimentalnih rezultatov lahko sklepamo, da je za duktilno obnašanje mehansko vijčenega spoja kompozitnih elementov potrebno upoštevati zadostno oddaljenost središča luknje od obremenjenega roba kompozitnega elementa katera znaša vsaj $a_{min}=3,5*d$. Pri večji oddaljenosti se je izkazalo, da imamo preveliko varnost, saj bi pri tako velikih pomikih v spoju verjetno prišlo že kje drugje na konstrukciji do prevelikih poškodb in bi bilo potrebno že prej sanirati poškodovan in deformiran element. Potrebno je izpostaviti, da smo vsa ostala razmerja dimenzij priključnih elementov, velikosti luknje vijaka v obremenjenih elementih in velikosti spojnega vijaka določili po navodilih priročnika Fiberline design manual [2]. Dodatno smo ugotovili, da se porušni mehanizmi ujemajo z napovedanimi porušnimi mehanizmi po pravilih omenjenega priročnika [2].

Armirane plastike so zaradi svojih mehanskih karakteristik zelo uporabne za posebne konstrukcijske namene, predvsem kjer smo omejeni z lastno težo in korozijsko odpornostjo konstrukcijskih elementov. Kljub že daljši prisotnosti armiranih plastik v ostalih panogah, v gradbeništvo še vedno niso doživele širše sprejetosti, predvsem zaradi pomanjkanja znanja o obnašanju takšnih konstrukcijskih elementov in posledično tudi nezaupanja v varnost celotne konstrukcije.

VIRI

- [1] Lawrence C. Bank: Composites for Construction: Structural design with FRP materials, 2006: XIII str.
- [2] Fiberline Composites, Fiberline Composites A/S, Design Manual – 2nd edition, 2003: 0.0.3 - 3.1.8 str.
https://fiberline.com/sites/default/files/media/online-tools/190107_dm_uk.pdf
(pridobljeno 01.05.2016)
- [3] Žarnić R., 6/2002. Osnovne lastnosti polimernih kompozitov, Gradbeni vestnik 6: 38 str.
- [4] Thomas Keller, Use of Fibre reinforced Polymers in Bridge Construction, 2003: 9-22 str.
- [6] Leonard Hollaway, Polymers and composites in construction, London, Thomas Telford Ltd, 1990: 275 str.
- [7] William D. Callister Jr., Materials science and engineering: an introduction, fifth edition, New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, John Wiley & Sons, inc., 2000: 506-523 str.
- [8] Tuakta C.: Use of Fiber Reinforced Polymer Composite in Bridge Structures, Massachusetts Institute of Technology, 2005: 3-27 str.
http://web.mit.edu/istgroup/ist/documents/2005_master_Use%20of%20fiber%20reinforced%20polym po%20composite%20in%20bridge%20structures_Tuakta.pdf (pridobljeno 06.07.2016).
- [9] <https://fiberline.com/>.
- [12] Jonh L. C.: Structural Design of Polymer Composites, EUROCOMP, Design Code and Handbook, 1996: 3-751 str.
- [13] Darko Beg, Andrej Pogačnik 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Inženirska zbornica Slovenije: 3.1-3.152 str.
- [14] <http://www.netcomposites.com/guide-tools/guide/manufacturing/>
(ogledano 10.07.2016).

[15] Bedford Reinforced Plastics, Inc. Design Guide and Design Guide Appendum.

<http://bedfordreinforced.com/design-guide/> (ogledano 10.7.2016).

[16] The New and Improved PultexR Pultrusion Design Manual by Creative Pultrusions Inc.

<http://www.creativepultrusions.com/index.cfm/connect-with-us/technical-papers/>

(ogledano 10.7.2016).

[17] EXTREN DWBR Design Guide by Strongwell.

<http://www.strongwell.com/news/the-strongwell-design-manual-is-online/> (ogledano 10.8.2016).

[18] Task Committee on Design of Structural Plastics Res Council of Asce: Structural Plastics

Design Manual (Asce Manual and Reports on Engineering Practice), 1984

Standardi:

[19] SIST EN 13706-1:2003. Ojačeni polimerni kompoziti – Specifikacije za pultrudirane profile –
1. del: Označevanje.

[20] SIST EN 13706-2:2003. Ojačeni polimerni kompoziti – Specifikacije za pultrudirane profile –
2. del: Preskusne metode in splošne zahteve.

[21] SIST EN 13706-3:2003. Ojačeni polimerni kompoziti – Specifikacije za pultrudirane profile –
3. del: Posebne zahteve.