УНИВЕРЗИТЕТ „ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ" - ШТИП

ТЕХНОЛОШКО - ТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Наука и технологија за текстил

Штип

м-р Силвана Жежова

ПРИМЕНА НА ТЕКСТИЛ ВО РАЗЛИЧНИ ФОРМИ И СОВРЕМЕНИ ТЕХНОЛОГИИ ЗА ДОБИВАЊЕ НА ПОЛИМЕРНИ КОМПОЗИТНИ СТРУКТУРИ

- ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА -

Штип, 2018

м-р Силвана Жежова

ПРИМЕНА НА ТЕКСТИЛ ВО РАЗЛИЧНИ ФОРМИ И СОВРЕМЕНИ ТЕХНОЛОГИИ ЗА ДОБИВАЊЕ НА ПОЛИМЕРНИ КОМПОЗИТНИ СТРУКТУРИ

Универзитет „Гоце Делчев“- Штип

КОМИСИЈА ЗА ОЦЕНКА И ОДБРАНА:

Интерен ментор: **Д-р Винета Сребренкоска,**

Редовен професор на Технолошко-технички факултет, Универзитет „Гоце Делчев“ - Штип.

Екстерен ментор: **Д-р Горан Дембовски,**

Редовен професор на Технолошко-металуршки факултет, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ - Скопје.

ЧЛЕНОВИ НА КОМИСИЈАТА ЗА ОЦЕНКА И ОДБРАНА:

Претседател: **Д-р Димко Димески,**

Редовен професор на Технолошко-технички факултет, Универзитет „Гоце Делчев“ - Штип.

Член: **Д-р Светлана Ристеска,**

Вонреден професор на Институтот за современи композити и роботика во Прилеп.

Член: **Д-р Горан Дембовски,**

Редовен професор на Технолошко-металуршки факултет, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ - Скопје.

Член: **Д-р Ацо Јаневски,**

Вонреден професор на Технолошко-технички факултет, Универзитет „Гоце Делчев“ - Штип.

Член: **Д-р Винета Сребренкоска,**

Редовен професор на Технолошко-технички факултет, Универзитет „Гоце Делчев“- Штип.

Научно поле: 223 Текстилно инженерство

Научна област: 22300 Текстилни и технички влакна

Датум на одбрана: 07.11.2018 г.

Датум на промоција: __________

ПОСВЕТА И БЛАГОДАРНОСТ

Посебна благодарност сакам да изразам на мојот ментор, ***проф. д-р Винета Сребренкоска,*** *чија несебична помош и залагање ги надмина рамките на вообичаена соработка при изработка на трудови од ваков ранг и која има огромен придонес во изработката на овој оригинален научен труд и моето целокупно научно и стручно усовршување.*

Благодарност до мојот коментор ***проф. д-р Горан Дембовски****, за посветеното внимание и позитивните критики.*

Благодарност до ***проф. д-р Светлана Ристеска,*** *за нејзината несебична поддршка, посветеност и ангажираност во текот на целиот процес на истражување.*

Благодарност до останатите членови на комисијата, ***проф. д-р Димко Димески*** *и* ***проф. д-р Ацо Јаневски,*** *за нивните корисни совети и сугестии во завршното оформување на трудот.*

Посебна благодарност до одговорните во ***Институтот за современи композити и роботика од Прилеп****, за големата соработка и отвореност која ми ја понудија за реализација на сите неопходни истражувања за потребите на докторскиот труд.*

И на крај, голема благодарност сакам да изразам до моето семејство и моите најблиски за трпението, безрезервната поддршка и разбирање за време на изработката на докторскиот труд.

Рецензирани и објавени трудови од областа на докторската дисертација:

1. Zhezhova, Silvana and Risteski, Sanja and Ristova, Elvira and Risteska, Svetlana and Srebrenkoska, Vineta (2018), „*Composite materials based on e-glass woven textile structures as reinforcement“.* Tekstilna industrija, 66 (2). pp. 4-8. ISSN 0040-2389.
2. Zhezhova, Silvana and Srebrenkoska, Vineta and Risteska, Svetlana and Risteski, Sanja (2018), „*Predicting the flexsural strength of textile composites based on glass fabrics“.* In: VIII International Metallurgical Congress, 30 May-3 June 2018, Ohrid, Macedonia.
3. Zhezhova, Silvana and Risteski, Sanja and Ristova, Elvira and Srebrenkoska, Vineta and Risteska, Svetlana (2018), "*Mechanical characterization of glass fabric/ epoxy composites"*. In: International scientific conference: Contemporary trends and innovations in the textile industry, 18 May 2018, Belgrade, Serbia.
4. Zhezhova, Silvana and Risteski, Sanja and Srebrenkoska, Vineta (2017), *"Fibrous structures as a reinforcement for composite materials"*.Tekstilna industrija, 64 (4). pp. 1-76. ISSN 0040-2389.
5. Zhezhova, Silvana and Risteski, Sanja and Srebrenkoska, Vineta (2017). *"Polymer composite based of textiles in various geometry".* V International Congress "Engineering, Environment and Materials in Processing Industry“. ISSN 978-99955-81-21-3.
6. Risteski, Sanja and Srebrenkoska, Vineta and Zhezhova, Silvana (2017), *"Analysis of composite materials based on polyethylene fibres for protective clothes".* Knowledge - International Journal, Scientific and Applicative Papers, 20.5 (5). pp. 2147-2525. ISSN 1857-923X.
7. Risteski, Sanja and Zhezhova, Silvana and Srebrenkoska, Vineta (2017). *"Commonly used textile fibers in composite industry for special purposes"*. International Journal Knowledge, 16.4. pp. 1673-1678. ISSN 1857-923X.
8. Risteski, Sanja and Zhezhova, Silvana and Srebrenkoska, Vineta (2017). "*Textile materials used in military protective clothes design".* V International Congress "Engineering, Environment and Materials in Processing Industry“. ISSN 978-99955-81-21-3.

9. Risteski, Sanja and Srebrenkoska, Vineta and Zhezhova, Silvana (2017). *“Applying of different fabrics for design of the protective military clothes”.* Quality of Life, 8 ((1-2)). pp. 56-63. ISSN 1986-602X.
10. Pop Metodieva, Biljana and Zhezhova, Silvana and Srebrenkoska, Vineta and Naseva, Simona and Srebrenkoska, Sara (2016), *“Design of polymer composite pipes produced by filament winding technology*”. Machines, Technologies, Materials, 10 (1). pp. 23-26. ISSN 1313-0226.
11. Srebrenkoska, Vineta and Risteska, Svetlana and Mijajlovikj, Maja and Srebrenkoska, Sara and Zhezhova, Silvana (2016), *“Mechanical and thermal properties of filament wound composite pipes”.* In: VII International Metallurgy Congress, Metallurgy, Materials and Environmental, 09-12 June 2016, Ohrid, Macedonia.
12. Srebrenkoska, Vineta and Zhezhova, Silvana and Naseva, Simona (2015). *“Hoop tensile properties of filament wound pipes”.* Machines, Technologies, Materials, 9 (11). pp. 28-31. ISSN 1313-0226.
13. Srebrenkoska, Vineta and Kotynia, Renata and Bojanowski, Krzysztof and Zhezhova, Silvana (2015), *“Mechanical characterization of the filament wound pipes for construction”.* In: Working Group Meeting Next Generation Design Guidelines for Composites in Construction, Lecce, Italy, 19-21 May 2015, Lecce, Italy.

ПРИМЕНА НА ТЕКСТИЛ ВО РАЗЛИЧНИ ФОРМИ И СОВРЕМЕНИ ТЕХНОЛОГИИ ЗА ДОБИВАЊЕ НА ПОЛИМЕРНИ КОМПОЗИТНИ СТРУКТУРИ

Краток извадок

Предмет на оваа докторска дисертација е детерминирање на влијанието и важноста на формата во која се користи текстилот како зајакнувачка компонента врз постигнатите физичко - механички својства на композитните материјали и дефинирање на употребната вредност на текстилните материјали за различни апликации во композитната индустрија. За апликација беа избрани стаклените влакна пред се поради перформансите од аспект на односот јачина/тежина, нивната достапност и ниската цена. За изработка на сите текстилни композити се користеше епоксиден смолен систем како матрица. Истражувањата во рамките на докторската дисертација се реализираа во два дела.

Во првиот дел беа применети Е - стаклени влакна во форма на континуиран ровинг (линеарни текстилни структури) за добивање на композитни цевчести структури со примена на технологија на намотување на филаменти при претходно определени услови. Композитните цевки беа изработени со различен дизајн со цел да се покаже влијанието на различниот агол на намотување на стаклените влакна врз физичко - механичките својства на текстилните композити. За сите произведени композитни цевки со помош на сплит - диск тест метода е испитувана јачината на истегнување. Добиените резултати покажаа дека аголот на намотување на зајакнувачката компонента има значајно влијание врз механичките својства на композитните цевчести структури. Поголеми агли на намотување на стаклените влакна обезбедуваат добивање на композитни цевки со поголема јачина на истегнување во лонгитудинална насока, додека јачината во аксијална насока се намалува. Ова овозможува дизајнирање на композитни цевчести структури со максимални перформанси преку селекција на аголот на намотување на влакната и оптимизирање на отпорноста на прстенот во потребната насока. Врз основа на СЕМ микрофотографии беше забележано дека постои добра атхезија помеѓу влакната и смолата, а на местата на прекин од фрактурата беше забележана одредена деструкција и на двете составни компоненти: влакната и матрицата.

Во вториот дел беа применети различни видови на ткаени структури од Е-стаклени влакна и Е - стаклен мат (дводимензионални текстилни структури) како зајакнувачка компонента во композитните материјали. Со примена на технологија на рачна импрегнација од различните видови на дводимензионални текстилни структури, беа изработени препрези со соодветни карактеристики кои дополнително беа процесирани во композитни плочи со примена на технологија на компресионо пресување. Дополнително, композитни плочи беа изработени и од готов Е- унидирекционален препрег. За сите произведени композитни плочи беше направена анализа на содржината на составните конституенти и содржината на пори (%) и беше тестирана јачината на свиткување и модулот на еластичност при свиткување со примена на методата со три точки на свиткување.

Добиените резултати покажаа дека композитните примероци зајакнати со Е - стаклена ткаенина се одликуваат со оптимална отпорност на силите на свиткување во надолжна и напречна насока. Типот на зајакнувачката компонента и ориентацијата на влакната како производни параметри, директно влијаат врз перформансите на композитните материјали зајакнати со текстил.

Клучни зборови: текстилни композити, стаклени влакна, стаклена ткаенина, неткаен текстил, унидирекционални ленти, препрег.

APPLICATION OF TEXTILE IN DIFFERENT FORMS AND CONTEMPORARY TECHNOLOGIES FOR OBTAINING POLYMER COMPOSITE STRUCTURES

Abstract

Subject of this doctoral dissertation is determining the influence and importance of the form in which textile is used as a reinforcing component, of the physical and mechanical properties of the obtained composite materials and defining the use value of textile materials for various applications in the composite industry. For application, glass fibers were chosen primarily because of their performance in terms of strength / weight ratio, their availability and low price. For the production of all textile composites, an epoxy resin system was used as a matrix. Research within the doctoral dissertation was realized in two parts.

During the first part of the research, E - glass fibers in the form of continuous roving (linear textile structures) were used in obtaining composite tubular structures using filament winding technology. The composite pipes with different design were produced in order to show the influence of the different angles of winding the glass fibers on the physical and mechanical properties of the obtained textile composites. With the assistance of split-disk test method the hoop tensile strength of all manufactured composite pipes was tested. The obtained results showed that the angle of winding of the reinforcing component has a significant influence on the mechanical properties of the composite tubular structures.

Namely, the bigger winding angle provides production of composite pipes with a higher hoop tensile strength in the longitudinal direction, while the strength in the axial direction decreases. This allows design of composite tubular structures with maximum performances by selecting the winding angle of the fibers and optimizing the resistance of the ring in the required direction. Based on the SEM microphotographs, it was noticed that there is a good adhesion between the fibers and the matrix, and at the points of the fracture, some destruction of the two components was observed: the fibers and the matrix.

During the second part of the research, different types of woven structures from E -glass fibers and E - glass mat (two-dimensional textile structures) were used as a reinforcing component in the composite materials. From all types of two-dimensional

textile structures, with the application of hand lay - up technology, prepregs with suitable characteristics were produced and additionally processed into composite plates by using compression molding technology. Additionally, composite plates were made from a ready E-unidirectional prepreg. For all manufactured composite plates, an analysis of the content of the constituent's components and the percentage of voids (%) was made, and the flexural strength and modulus of elasticity in flexure was tested by using a three-point flexural method.

From the obtained results it can be concluded that the composite samples reinforced with E - glass fabrics have optimum resistance of the flexural forces in the longitudinal and transverse direction. The type of reinforcing component and the orientation of the fibers as production parameters influence directly the performance of textile reinforced composite materials.

Key words: textile composites, glass fibers, glass fabric, non-woven textile, unidirectional tapes, prepreg.

СОДРЖИНА

1. ВОВЕД 1

2. ТЕОРЕТСКИ ДЕЛ 7

2.1 Композитни материјали - основни дефиниции 7

2.2 Структурни елементи 8

2.3 Видови на текстилни претформи 11

2.4 Влакна кои се користат за комплексни текстилни структури 18

2.5 Стаклени влакна 20

2.5.1 Типови на стаклени влакна 22

2.5.1.1 Обични евтини влакна, за општа намена 23

2.5.1.2 Премиум влакна, за специјална намена 23

2.5.2 Хемиски својства 25

2.5.3 Механички и физички својства 27

2.5.4 Статички замор на стаклените влакна 32

2.5.5 Финиширање 32

2.5.6 Важни комерцијални продукти 33

2.5.6.1 Стаклен мат 34

2.5.6.2 Стаклен ровинг 34

2.5.6.3 Комбинации на мат и ткаен ровинг 36

2.5.6.4 Предива за текстилна апликација 36

2.5.6.5 Стаклени ткаенини 38

2.6 Материјал за матрица 45

2.6.1 Епоксидни смоли 50

2.7 Процеси на производство 56

2.7.1 Рачно положување 57

2.7.2 Положување на препрег 61

2.7.3 Компресионо пресување 63

2.7.4 Процес на намотување на филаменти 65

2.7.4.1 Методи за намотување и импрегнација во технологијата за намотување на филаменти 69

2.8 Литературен преглед 72

3. ЦЕЛ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО 81

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН ДЕЛ 83

4.1 Примена на линеарни текстилни структури како зајакнувачка компонента во композитните материјали 83

4.1.1 Материјали користени за експериментите 83
4.1.2 Производство на полимерните композитни цевки 86
4.1.3 Методи за испитување на физичко - механичките својства на полимерните композитни цевки 89
4.1.3.1 Определување на содржината на составните компоненти во композитните примероци 89
4.1.3.2 Определување на јачината на истегнување 92
4.1.4 Карактеризација на површината на добиените композитни цевки по фрактура 95
4.2 Примена на дводимензионални текстилни структури како зајакнувачка компонента во композитните материјали 96
4.2.1 Ткаени структури од Е стаклени влакна со различен преплет 97
4.2.1.1 Определување на структурните карактеристики на применетите дводимензионални текстилни структури 98
4.2.1.2 Карактеризација на структурата на применетите текстилни материјали со скенинг електронска микроскопија 99
4.2.1.3 Определување на основните физичко - механички карактеристики на применетите дводимензионални текстилни структури 100
4.2.2 Е - стаклен неткаен текстил 102
4.2.3 Е - унидирекционален стаклен препрег 102
4.2.4 Производство на препрег и полимерни композитни плочи 103
4.2.5 Методи за испитување на својствата на полимерните композити плочи 108
4.2.5.1 Определување на содржината на составните компоненти во композитните примероци 109
4.2.5.2 Јачина и модул на еластичност при свиткување 110
5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА 114
5.1 Определување на физичко - механичките својства на полимерните композитни цевки 114
5.1.1 Определување на содржината на составните компоненти во композитните примероци 114
5.1.2 Определување на јачината на истегнување на композитните прстенести примероци 116
5.1.3 Скениниг електронска микроскопија (СЕМ) на тестираните композитни прстени 125
5.2 Примена на дводимензионални текстилни структури како зајакнувачка компонента во композитните материјали 128
5.2.1 Структурни карактеристики на применетите дводимензионални текстилни структури 128

5.2.2 Карактеризација на структурата на применетите текстилни материјали со скенинг електронска микроскопија 130
5.2.3 Механички карактеристики на применетите дводимензионални текстилни структури 132
5.2.4 Испитување на својствата на полимерните композити плочи зајакнати со Е - стаклена ткаенина 136
5.2.4.1 Определување на содржината на составните компоненти во композитните примероци 136
5.2.4.2 Јачина на свиткување и модул на еластичност при свиткување ... 142
5.2.5 Испитување на својствата на полимерните композити плочи зајакнати со Е – стаклен неткаен текстил 164
5.2.5.1 Определување на содржината на составните компоненти во композитните примероци 164
5.2.5.2 Јачина на свиткување и модул на еластичност при свиткување ... 167
5.2.6 Испитување на својствата на полимерните композити плочи зајакнати со УД ленти 175
5.2.6.1 Определување на содржината на составните компоненти во композитните примероци 175
5.2.6.2 Јачина на свиткување и модул на еластичност при свиткување ... 177
5.3 Компаративна анализа на полимерните композитни структури зајакнати со текстил во различни форми 184
6. ЗАКЛУЧОК 188
7. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА 195
8. ЛИСТА НА ТАБЕЛИ 205
9. ЛИСТА НА СЛИКИ 207
10. ПРИЛОЗИ 210

1. ВОВЕД (INTRODUCTION)

Композитните материјали зајакнати со текстил се нарекуваат текстилни композити (Reber, 1999). Развојот на текстилните композитни материјали, нивниот дизајн и производната технологија, е едно од најважните достигнувања во инженерството на материјалите (Dehury, 2013). Текстилните композити се конкуренти материјали не само поради нивната јачина (како резултат на присуството на текстилниот зајакнувач), туку и поради единствената способност да го пренесуваат напрегањето (благодарение на полимерната матрица) (Zănoagă и Tanasă, 2014). Една од најголемите разлики на текстилните композити во однос на конвенционалните материјали, како што се алуминиумските и железните легури, е тоа што тие се типично анизотропни материјали. Карактеристиките на текстилните композитни материјали се различни во различни насоки на материјалот и може да варираат во широк интервал на вредности (Matabola et al., 2009). Кај композитите е отворена можноста технологот да состави материјал кој ќе одговара на потребите за соодветна крутост и јакост за одредена апликација. Во зависност од потребите и условите на експлоатација, одредени карактеристики на композитните материјали може да се менуваат. За разлика од композитите, конвенционалните материјали се изотропни и тие имаат идентични својства во сите насоки (Сребренкоска et al., 2013). Друга предност е нивната отпорност на корозија што овозможува нивно долготрајно користење во средини, во кои металите имаат краток век поради корозијата. Ова се должи на фактот што текстилните материјали го задржуваат својот интегритет и однесување под екстремни услови: тие не се подложни на корозија при изложување на надворешни влијанија, покажуваат димензиона стабилност при значителни температури и не се чувствителни на електромагнетно зрачење. Овие композити, исто така, покажуваат подобра отпорност на замор во однос на металите. Текстилните зајакнувачи овозможуваат да се добијат композити со подобар соодност тежина - јачина во споредба со челикот и други класични материјали кои се користат за такви апликации. Причините за апликација на полимерните композитни материјали зајакнати со текстил можат да бидат различни и комплексни, но сепак примарната компонента за употребата на текстилните зајакнувачи е, несомнено, цената.

Текстилот може да се произведува во големи количини со разумни трошоци и тоа со користење на современи, автоматизирани производствени техники (Long, 2005).

Текстилните композити наоѓаат голема примена за изработка на современи структури во многу индустриски апликации, како структури за складирање и транспорт (резервоари, цевки, црева, итн.) во геотехничката, воздушната, вселенската, автомобилската и поморската индустрија (Mallick, 1997). Голем број на структури за Airbus A380 патнички авион се потпираат на текстилни композити, вклучувајќи притисна преграда во облик на купола со дијаметар од шест метри и панели за работ по должината на крилото, произведени врз основа на јаглеродни ненабрани ткаенини со инфузија на филм од смола (RFI), вцврснувачи и греди за крила направени од RTM, греди за опашката на авионот со вакуум инфузија (VI) и крило водечки рабови од термопластични композитни (стакло/поли (фенилен сулфид)) (McCarthy et al., 1994). Постојат бројни апликации во автомобилската индустрија, првенствено за дел од пазарот за производи од таа гранка или за високо перформанси возила. Во денешно време од голем практичен интерес е нивната апликација во индустријата за производство на електрична енергија (ветерници - со перки на турбината во должина до 60 метри произведени со користење на ненабрана стаклена или јаглеродна ткаенина како зајакнувач импрегнирана со вакумска инфузија) (Mouritz et al., 2000). Значајна е и нивната апликација во градежната индустрија како зајакнувачи на ѕидните структури, за изработка на композитни мостови кои нудат значителни заштеди на трошоците за инсталација поради нивната мала тежина (Ciobanu, 2011). Мембрана структурите, што се користат за сериозно промовирање (во архитектонски поглед) како Милениумската купола (Millennium Dome) во Гринич (Greenwich), Велика Британија, се исто така, еден вид на текстилен композит. Исто така, големи количини на композити зајакнати со текстилни материјали се користат во индустриите за производство на спортска и заштитна опрема. Ова се должи пред сè на нивните извонредни физички, механички и термички својства, особено на малата тежина, високата крутост и јачина, добрата отпорност на замор, одличната отпорност на корозија и димензионата стабилност, како и ниските производни трошоци и лесното ракување (Edward, 2011 и Lei et al., 1999).

Големиот избор на матрици и текстилни материјали е добра можност да се избере соодветната комбинација за дадена апликација. Бидејќи својствата на текстилните композити се анизотропни и од нехомогена природа, параметрите кои ги контролираат механичките својства пред се зависат од текстилниот материјал кој се користи како зајакнувач, воглавно од неговата структура, својствата, геометријата, распределбата, ориентацијата и сл. Во технологиите на современите композити доминираат: стаклените, јаглеродните и арамидните влакна. Текстилот може да биде достапен во различни форми: како континуиран ровинг (tow, roving), унидирекционален материјал (unidirectional) - еднонасочна лента на паралелни, континуирани влакна, ткаен материјал (woven) во различни геометрии, плетенина (unwoven), филц или мат (nonwoven) - со случајно ориентирани влакна (Miravette, 2004). Сите овие форми обезбедуваат извесна предност, но и ограничување на композитната структура, во однос на процесот на обликување, економичноста и естетиката.

Во зависност од типот, намената и својствата кои треба да ги поседува композитниот материјал, постојат повеќе методи и процеси за производство. Изборот на производниот процес зависи од типот на применетите материјали (матрица, текстилен зајакнувач), температурата потребна за формирање на композитната структура и за вмрежување на матрицата, како и ефективноста на процесот од аспект на трошоците. Често пати при дизајнот на композитната структура, прво, во предвид се зема процесот на производство. Ова е поради тоа што избраниот производен процес мора да е соодветен за добивање на композитна структура со даден дизајн, а исто така, во предвид треба да се земат трошоците, волуменот и стапката на производство. Поради тоа дизајнерот мора да ги познава предностите, ограничувањата, трошоците, стапката и волуменот на производство, како и типичната примена на различните производни процеси (Barbero, 2011).

Процесирањето на полимерните композитни материјали ги вклучува следниве операции:

1. Позиционирање на влакната во бараната ориентација;
2. Импрегнација на влакната со смола;

3. Консолидација на импрегнираните влакна со цел да се отстрани вишокот на смола, воздух и испарувања;
4. Вмрежување или солидификација на полимерот;
5. Вадење од калапот и
6. Доработка (завршни операции).

Различните производни процеси се разликуваат според начинот на кој операциите се изведуваат. Некои од овие операции може да се комбинираат на едноставен начин со цел да се заштеди на време. На пример, позиционирањето на влакната, импрегнацијата и консолидацијата, симултано се изведуваат кај процесот на намотување на филаменти. Некои операции може претходно да бидат изведени како импрегнацијата на препрегот кој последователно се користи при рачното положување. Различните начини на процесирање на материјалите има значително влијание врз трошоците, стапката на производство, квалитетот и перформансите на крајниот производ. Секој метод на производство има предности и ограничувања кои влијаат на структуралниот и материјалниот дизајн на композитната структура (Barbero, 2011).

Една од применуваните технологии за производство на полимерни композитни материјали зајакнати со текстил е „процесот на намотување на филаменти“ (Filament - winding process). Вообичаено овој процес се користи за производството на цилиндрични и сферични форми т.е. се користи за производство на резервоари и цистерни за хемикалии и горива, како и за производство на цевки со различен дијаметар (од неколку сантиметри до еден или два метри) (Pinar, 2005). Процесот на намотување на влакната (текстилниот зајакнувач) дава можност дизајнерот да ги креира механичките карактеристики и да ги оптимизира јачината, цврстината и термичката стабилност на добиените композитни структури. Најчесто користени зајакнувачки текстилни структури при процесот на намотување на филаменти се континуираните стаклени, јаглеродни или арамидни влакна, додека од полимерните матрица примена наоѓаат термореактивни смолни системи (Hull и Clyne, 1996). Постојат бројни параметри кои се предмет на анализа во процесот на намотување на филаменти бидејќи механичките својства на добиените композитни материјали се детерминирани пред се од својствата на нивните одделни конституенти. Основните параметри кои најчесто се регулираат се: бројот на намотани влакна, аголот на

намотување, брзината на намотување, брзината на ротација на мандрелот, силата на затегнување на влакната, вискозитетот на смолата и времето на задржување на влакната во смолата т.е. времето на натопување на влакната.

Технологијата на импрегнација се користи за добивање на препрег. Препрег е преимпрегниран материјал зајакнат со влакна каде смолата е делумно вмрежена или вцрстена. Влакната може да бидат во форма на унидирекционална лента, ткаенина или мат со случајно ориентирани влакна. Бидејќи смолата е делумно вмрежена, препрезите имаат ограничен рок на употреба, кој може да се зголеми со нивно чување во замрзнувачи. Препрезите наоѓаат широка примена за изработка на високо перформанси делови со комплексна геометрија. Повеќето препрези се изработени од епоксиден смолен систем и како зајакнувачи, вообичаено, примена наоѓаат стаклените, јаглеродните и арамидните влакна. Една од главните предности на примената на препрезите е тоа што тие содржат висок волуменски удел на влакната кои се униформно распоредени, како и нивното едноставното производство, додека еден од главните недостатоци е што оваа технологија е бавна и потребно е вложување на поголем труд, како и примена на поскапа опрема за вмрежување (Hull и Clyne, 1996).

Наједноставниот и најчесто користен производен процес е техниката на рачно положување, исто така позната како влажно положување. Во основа овој процес се состои од рачно положување на сув зајакнувач во калапот и последователна апликација на смола. Потоа влажниот композит се поминува со рачни ваљаци со цел да се олесни униформната дистрибуција на смолата и отстранување на воздушните џебови. Овој процес се повторува се додека не се постигне посакуваната дебелина. Положената структура потоа се вмрежува. Процесот на рачно положување може да биде поделен во четири основни чекори: подготовка на калапот, обложување со гел, положување и вмрежување. Предности на примената на процесот на рачно положување се: производство на големи делови со комплексна геометрија, лесно производство на делови кои бараат перфектна доработка, минимална инвестиција за опрема, минимални трошоци за алат, содржина на пори под 1%, возможна е конструкција на сендвич структури и сл.. Главни недостатоци на оваа техника се: ниската стапка на производство, потребно е вложување на голем труд, униформноста на

произведените делови тешко се одржува, имаме висока емисија на испарувања, квалитетот на произведените делови во голема мера зависи од вештините на работниците и др.. Стапката на производство и трошоците за техниката на рачно положување варираат во широк интервал и зависат од влакната и матрицата кои се користат, големината на делот кој треба да се произведе и процесот кој се користи. Ова техника најчесто наоѓа примена во поморската, авионската индустрија, за производство на структурни делови и др. (Barbero, 2011).

Друга технологија која, исто така, наоѓа широка примена за производство на текстилни композити е технологијата на компресионо пресување, која е една од наједноставните техники за производство на композити (Barbero, 2011). Ова техника ги минимизира трошоците за подготовка на деловите, речиси го елиминира отпадот од материјал, ја редуцира секундарната доработка и бара вложување на минимален труд. Процесот лесно може да се автоматизира, овозможувајќи висока продуктивност со многу добра униформност и квалитет на произведените делови. Најчесто користени компоненти при процесот на компресионо пресување се BMC (прес маса) и SMC (ленти за пресување). Сечкани влакна, влакнести претформи и препрег, исто така, може да се користат.

Затоа, особен научен, но и практичен предизвик претставуваат истражувањата за примената на текстилните зајакнувачи во различни форми за добивање на композитни материјали, технологиите за нивно добивање, како и карактеризација на нивните физичко-механички својства, од што и произлезе мотивот и определбата за темата на оваа докторска дисертација.

2. ТЕОРЕТСКИ ДЕЛ (THEORETICAL PART)

2.1 Композитни материјали - основни дефиниции (Composite materials - basic definitions)

Многу современи технологии бараат материјали со невообичаена комбинација на својства кои не можат да бидат исполнети од страна на конвенционалните метални легури, керамиката и полимерните материјали. Во голем број индустрии неопходни се структурни материјали коишто имаат голема јачина, ниска густина, отпорност на удар, отпорност на абразија и материјали коишто не кородираат. Ова комбинација на својства може да биде реализирана со примена на композитните материјали (Сребренкоска et al., 2013).

Композитите се дизајнирани материјали составени од два или повеќе конститутивни елементи со значително различни физички и хемиски својства, кои во структурата на новиот материјал останувaат макроскопски одвоени и различни, што укажува на физичкото, а не на хемиското спојување на истите (не се раствораат ниту поврзуваат помеѓу себе) (Jones, 1999 и Callister et al., 2010). Составните делови на композитот ги задржуваат своите индивидуални, физички и хемиски својства, но со заемна интеракција се добиваат композитни материјали, со карактеристики кои се супериорни во однос на конституентите што ги сочинуваат (Nayak et al., 2015 и Rahman et al., 1999).

Во дизајнирањето на композитните материјали, научниците и инженерите имаат можност со соодветна комбинација на различни текстилни материјали, метали, керамика и полимери да креираат нова генерација материјали со невообичаени својства. *„Ако еден материјал не може целосно да ги исполни сите конструктивни барања, два или повеќе материјала можат“.*

2.2 Структурни елементи (Structural elements)

Композитите се материјали кои ги сочинуваат два основни елемента, од кои едниот се нарекува матрица (matrix) или основен материјал, која е континуирана фаза и која може да биде органска или неорганска, во која се додава другиот елемент, односно компонента, т.е. зајакнувач (reinforcement) (носечки материјал), кој често се нарекува диспергирана фаза, со цел постигнување на неопходната комбинација на својства (цврстина, густина, крутост, тврдина, топлинска и електрична спроводливост) (Chawla, 1998 и Mazumdar, 2002). Важно е да се разбере дека за најголем дел композитни материјали, зајакнувачот ја дава потребната јакост и крутост на композитниот материјал, а матрицата или врзивното средство е неопходна за поврзување, одржување позиција и ориентација на зајакнувачот и за пренесување на оптоварувањето помеѓу зајакнувачот во сите насоки (Chauhan et al., 2011 и Siddhartha et al., 2012).

Својствата на композитниот материјал зависат од својствата на конститутивните фази, нивните удели, геометријата на зајакнувачот (дисперзираната фаза) и атхезијата помеѓу зајакнувачката фаза и матрицата. Под „геометрија на дисперзирана фаза“ се подразбира обликот и големината на честичките, нивната распределба и ориентација во матрицата. Кај сите видови композитни материјали механизмот на зајакнување зависи од геометријата на зајакнувачот (Mallick, 2008 и Miller, 1990).

Композитните материјали може да се класифицираат според различни критериуми и тоа (Barbero, 2011):

1. Геометријата на зајакнувачката компонента

- ***Континуирани долги влакна:***
  - Еднонасочни ориентирани влакна;
  - Двонасочни ориентирани влакна;
  - Случајно ориентирани;
- ***Дисконтинуирани влакна (кратки):***
  - Насочени;
  - Случајно ориентирани;
- ***Честички:***
  - Насочени;
  - Случајно ориентирани;

2. Конфигурацијата на ламинатот

- Еднонасочни, составени од неколку слоеви на ист материјал со иста ориентација во сите слоеви;
- Ламинати, каде барем еден слој има различна ориентација или е составен од друг материјал;

3. Хибридни структури

- Различни материјали во различни слоеви (на пример: биметални);
- Различни зајакнувачи во слој (на пример: мешавина од борни и јаглеродни влакна).

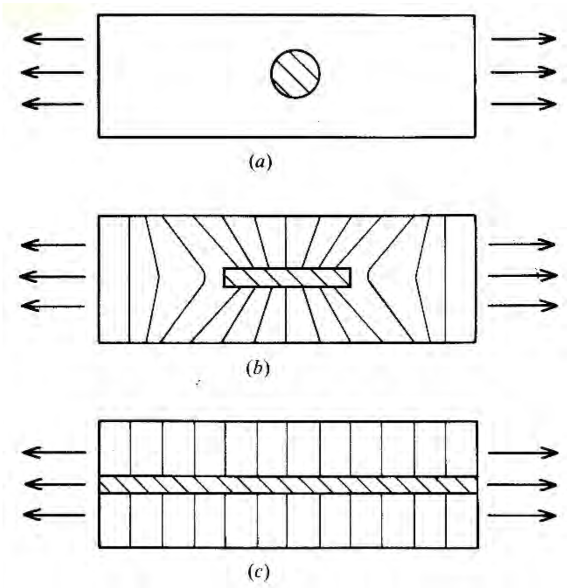
Една од основните класификации на композитните материјали е според геометријата на зајакнувачката компонента. Кај оваа класификација основен параметар е соодносот на максималната спрема минималната димензија на зајакнувачот, т.н. карактеристичен однос (aspect ratio).

Композитите со дисперзни честици претставуваат еден од крајните случаи кога тој однос е еднаков на единица, додека оние со бесконечни влакна се другиот краен случај кога односот е еднаков на бесконечност. Композитите со кратки влакна, кај кои односот на должината кон пречникот обично е од 10 до 1000, се наоѓаат помеѓу овие два крајни случаи.

Дисперзните честици, практично, не можат да имаат примарен зајакнувачки ефект, затоа што само мал дел од приложеното напрегање врз матрицата може да биде пренесено на честицата, а рушењето се случува или по границата на фазите или во матрицата, при услов честиците на полнилото да се појаки од матрицата. Притоа може да се набљудува секундарен ефект на зајакнување, бидејќи ако честиците се поцврсти од матрицата (што е најчест случај) тогаш тие ќе пречат на попречното собирање на матрицата (еластично или пластично). Како резултат на ова, доаѓа до обемно - напрегната состојба, што и го зголемува нивото на рушечко напрегање при растегнување, Слика 2. 1 (Schwartz, 1984).

Кај континуираните влакна, ако се занемари ефектот на нивните краеви, може да се претпостави дека и влакната и матрицата се деформираат исто, а приложеното напрегање се дели меѓу двете фази пропорционално на нивните релативни површини на попречен пресек и модулите на еластичност. Во тој случај, внесувањето голем волуменски удел на јаки високомодулни влакна во нејака пластична матрица ќе овозможи во принцип целосна реализација на

својствата на влакната (Mohanty et al., 2001 и Hoa, 2009). Композитните материјали зајакнати со континуирани влакна имаат најдобри механички особини. Се преферира примена на влакната како зајакнувачка компонента бидејќи повеќето материјали се многу појаки во форма на влакна отколку во невлакнеста форма. Потенцијалниот ефект на зајакнување кај трите типа композити, може да се оцени од Слика 2. 1 (Schwartz, 1984 и Srebrenkoska, 2002).



Слика 2. 1 Влијание на карактеристичниот однос l/d на честичките на зајакнувачот врз распределбата на напрегањата во матрицата: a) сферна честичка, l/d = 1; b) кратко крто влакно, l/d = 10-1000; c) бесконечно влакно, l/d = ∞

Figure 2. 1 Influence of the characteristic relation l/d of the particles on the distribution of stresses in the matrix: a) spherical particle, l/d = 1; b) short fiber, l/d = 10-1000; c) infinitely fiber, l/d = ∞

Текстилните структурни композити претставуваат класа на современи материјали зајакнати со текстилни претформи наменети пред се за примарни структурни апликации. Користејќи ја уникатната комбинација од мала тежина, еластичност, јачина и крутост, текстилните структури веќе долго време се препознаваат како атрактивна зајакнувачка компонента за производство на различни видови на композитни структури за најразлични апликации.

Текстилните претформи претставуваат влакнести структури со претходно одредена ориентација на влакната, преобликувани и често пати преимпрегнирани со матрица наменети за производство на композитни

материјали. Микроструктурната организација на влакната во рамките на претформата или структурните карактеристики на влакната ја детерминираат геометријата и распределбата на порите во рамките на композитниот материјал. Текстилните претформи, не само што играат клучна улога во трансформацијата на својствата на влакната во сложени композитни перформанси, туку и влијаат врз лесното или тешкото инфилтрирање на матрицата и консолидацијата (Ko, 1993).

Со комбинирање на влакна со високи перформанси, матрици и правилно приспособен интерфејс влакна / матрица, креативната употреба на влакнестите структури овозможува значително проширување на опциите за дизајн на појаки и поцврсти композити материјали. Неодамнешните достигнувања на полето на компјутерски поддржаниот дизајн и производството, го олеснија прилагодувањето на традиционални текстилни процеси за креирање на 2-Д и 3-Д текстилни структури при релативно ниски производни трошоци. Имајќи ја во предвид критичната улога што ја играат овие претформи во производството и перформансите на композитни материјали, значајно е зголемен интересот за текстилните композити.

2.3 Видови на текстилни претформи (Types of textile preforms)

Видовите на текстилни претформи се предмет на интерес на голем број на автори. Генерално, класификацијата на текстилните структурни претформи треба да ја рефлектира макро геометријата (на пр. обликот и димензијата), методот на производство на текстилната структура и структурната микро геометрија. Микро геометријата ја вклучува насоката на положување на зајакнувачот, линеарноста на зајакнувачот во секоја насока, континуираноста на зајакнувачката компонента, линеарната густината (финоста) на влакната, бројот на предива во секоја насока (основа и јаток), структурните карактеристики на предивата итн. (Ko, 1989 и Axinte et al., 2016).

Од аспект на нивната структура (Ko, 1993 и Scardino, 1989) текстилните зајакнувачи можат да се класифицираат во 4 нивоа и тоа (таб. 2. 1): дискретни структури (влакна), линеарни структури (предива), ламинарни структури со рамна геометрија (2Д текстилни материјали) и комплетно интегрирани структури со просторна геометрија (3Д текстилни материјали).

Табела 2. 1 Различни нивоа на текстилни структури за композити
Table 2. 1 Various level of fiber architecture for composite

Ниво/ Level	Зајакнувачки систем/ Reinforcement system	Структура на текстилот/ Textile construction	Должина на влакната/ Fiber length	Ориентац. на влакната/ Fiber orientation	Преплетување на влакната/ Fiber entanglement
I	Дискретен/ Discrete	Сечкани влакна/ Chopped fiber	Дисконтинуирана/ Discontinuous	Неконтрол./ Uncontrolled	Не постои/ None
II	Линеарен/ Linear	Филаментни предива/ Filament yarn	Континуирана/ Continuous	Линеарна/ Linear	Не постои/ None
III	Ламиниран/ Laminar	Едноставни текстилни мат./ Simple fabric	Континуирана/ Continuous	Рамнинска/ Planar	Рамнинско/ Planar
IV	Интегриран/ Integrated	Современи текстилни мат./ Advanced fabric	Континуирана/ Continuous	3-Д/ 3-D	3-Д/ 3-D

Ниво I - Систем на дискретни влакна (сечкани влакна или влакнест мат), кои немаат материјален континуитет и кај овие структури тешко е да се постигне прецизна контрола врз ориентацијата на влакната. Структурниот интегритет на влакнестата претформа е постигнат главно од фрикцијата помеѓу влакната.

Ниво II - Континуиран филамент или еднонасочно (унидирекционално) ориентиран (0°) систем. Оваа структура има највисоко ниво на континуираност и линеарност на влакната, а со тоа има и највисоко ниво на ефикасност во пренесувањето на својствата и е многу погодна структура за примена при технологијата на намотување на филаменти. Главен недостаток на оваа структура е нејзината внатрешна и интерламинарна слабост поради отсуството на преплетување на влакната.

Ниво III - Рамнински испреплетен систем. Иако проблемот со интраламинарниот недостаток поврзан со континуираните филаменти е решен со оваа структура, сепак интерламинарната јачина е пред се детерминирана од јачината на матрицата.

Ниво IV - Целосно интегриран систем каде што влакната се ориентирани во различни насоки во и надвор од просторната рамнина. Со примена на континуирани филаментни предива може да се формира 3-Д мрежа од предива на интегрален начин. Најатрактивната карактеристика на оваа интегрирана структура е примената на дополнителен зајакнувач во напречен правец, што го прави композитот практично без раздвојување. Друга значајна карактеристика

на интегрираните структури, како што се 3-Д ткаените, плетените и неткаените структури е нивната способност да формираат комплексни структурни форми.

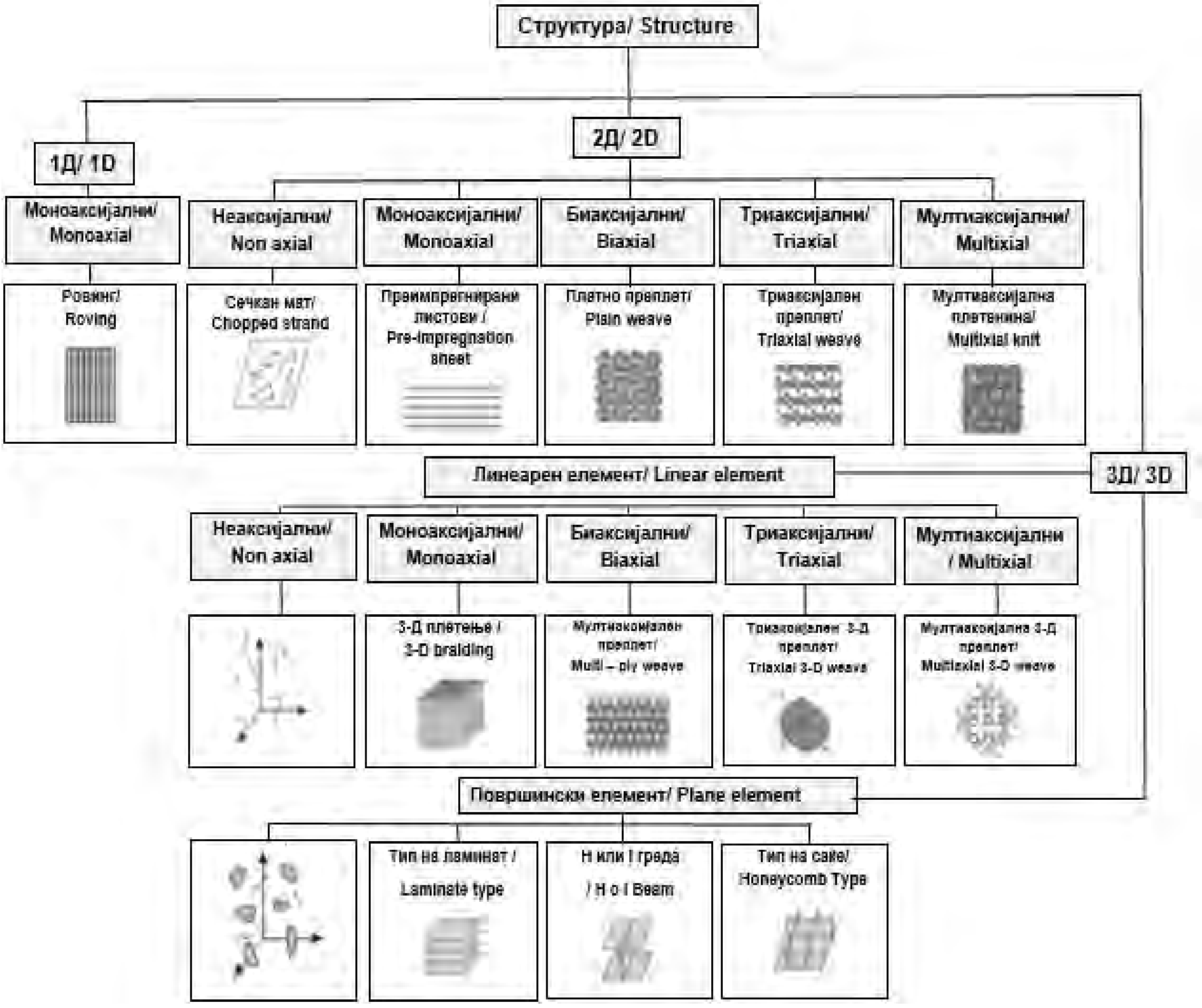
Од аспект на применетиот метод на производство и макроструктурната геометрија на текстилната претформа, текстилните структурни зајакнувачи може да се класифицираат според насоката на ориентација на влакната или предивата и нивната специфична геометрија (Hu, 2008; Fukuta et al., 1984 и Cherif, 2016). Како што е прикажано на Слика 2. 2 текстилните структури може да се класифицираат на следниов начин: **еднодимензионални** (неориентирани - ровинг предива), **дводимензионални** (***неориентирани*** - сецкан мат; ***моноаксијални*** - преимпрегнирани унидирекционални структури; ***биаксијални*** - ткаени структури со платно преплет, ***триаксијални*** - триаксијално ткаени структури и ***мултиаксијални*** - ***мултиаксијално*** ткаени и плетени структури) и **тридимензионални структури со линеарен елемент** (3Д плетенка, мултиаксијално ткаени структури и 3Д триаксијално и мултиаксијално ткаени структури) и **тридимензионални структури со површински елемент** (ламинати, греди, саќе структури).

Постојат неколку различни класификации на 3Д ткаените текстилни материјали во зависност од начинот на добивање, процесот на ткаење, геометријата и конфигурацијата, испреплетувањето и ориентацијата на влакната (Khokar, 2001; Chen, 2007 и Bilisik, 2013). Според Khokar, 2001, 3D ткаенините се класифицирани на следниот начин (таб. 2. 2):

1. Конвенционален 2Д процес на ткаење дизајниран за преплетување на два ортогонални сета на предива (основа и јаток). Со овој процес се добива 2Д ткаенина со примена на 2Д машина за ткаење.
2. Конвенционален 2Д процес на ткаење кој користи три сета на предива (темелна основа, ефектна основа и ефектен јаток) за да се произведат ткаенини со флор површина (јамки), познати како 2.5Д ткаенини.
3. Конвенционален 2Д процес на ткаење дизајниран за преплетување на два ортогонални сета на предива (основа и јаток) со дополнителен сет на предива кои функционираат како поврзувачка основа или испреплетени предива во напречна насока или Z насока. Овој процес се нарекува повеќеслојно

(мултиаксијално) ткаење и се применува за добивање на испреплетени 3D ткаенини кои се состојат од два сета на предива на 2Д машина за ткаење.

4. Конвенционален 2Д процес на ткаење кој користи три сета на предива за да произведе неиспреплетена ткаенина со предива во насока на основата, јатокот и во напречна насока. Со примена на овој процес се добиваат 3Д ткаенини кои се состојат од три сета на предива на 2D машина за ткаење .
5. 3Д процес на ткаење дизајниран за преплетување на три ортогонални сета на предива. Со овој процес се произведуваат комплетно испреплетени 3D ткаенини, каде што сите три групи на ортогонални предива се преплетуваат на специјално дизајнирана 3D машина за ткаење.



Слика 2. 2 Типови на текстилен зајакнувач
Figure 2. 2 Types of textile reinforcement

Табела 2. 2 Систем на класификација на 3Д ткаенините според Khokar, 2001
Table 2. 2 Classification system of 3D fabrics by Khokar, 2001

	Разбој/ Loom	**Димензии на ткаенината/ Fabric dimension**	**Структура/ Structure**	**Преплетување на предивата/ Yarn interlacement**
1	Конвенционален 2Д разбој/ Conventional 2D loom	2Д ткаенини/ 2D fabrication	Ортогонална/ Orthogonal	Преплетување на основата и јатокот во една хоризонтална рамнина/ Warp & weft interlacing in one plane, horizontal
2	Конвенционален 2Д разбој/ Conventional 2D loom	2.5Д ткаенини/ 2.5 D fabrication	Конвенционално ткаена/ Conventionally woven	Преплетување на основа, слој основа и слој јаток во 2 меѓусебно перпендикуларни рамнини /Interlacing of warp, warp pile & weft pile in 2 mutually perpendicular planes
3	Конвенционален 2Д разбој/ Conventional 2D loom	3Д ткаенини/ 3D fabrication	Ортогонална со предива напречно (повеќеслојна)/ Orthogonal with through the - thickness, (multilayer)	Напречно преплетување на ортогоналната основа и јатокот/ Interlacing orthogonal warp & weft with through the thickness
4	Конвенционален 2Д разбој/ Conventional 2D loom	3Д ткаенини/ 3D fabrication	Без ткаење/ Non-woven	Без преплетување на основата и јатокот и напречно (низ дебелината) Non-interlacing warp, weft & through the thickness
5	Специјален 3Д разбој/ Specialized 3D loom	3Д ткаенини/ 3D fabrication	Ортогонална/ Orthogonal	Три сета на ортогонални предива, вертикален и хоризонтален механизам за добивање на структура од редови и колони/ Three sets of orthogonal yarns, vertical, and horizontal shed obtaining a structure of columns & rows
6	Машина за добивање на неткаен текстил /Nonwoven	Неткаени 3Д ткаенини/ Nonwoven 3D fabrication	Ортогонална/ Orthogonal	Три сета на ортогонални предива поврзани заедно со посебен процес на врзување/ Three sets of orthogonal yarns held together with a special binding process

6. Процес за добивање на неткаена, неиспреплетена 3Д ткаенина, дизајниран за поврзување на три ортогонални сета на предива, без преплетување, односно без да се користи процес на ткаење или плетење. Ткаенината се одржува заедно со посебен процес на врзување.

Soden и Hill додале нова категорија позната како 4А на класификацијата на Khokar која се однесува на ткаенините кои можат да бидат поставени помеѓу категориите 4 и 5 каде што конвенционалниот 2Д процес на ткаење користи три сета на предива за да се произведе испреплетена 3Д ткаенина со предива во правец на основата, јатокот и напречно (Soden и Hill, 1998).

Познато е дека 3Д ткаенините може да се произведуваат со примена на конвенционални машини за ткаење и специјално изработени машини/ уреди за ткаење. Без оглед на видовите на машини кои се користат, технологијата на ткаење е способна за конструирање на 3Д ткаенини со многу различни геометриски форми. Chen ги проучувал конфигурациите и геометријата на 3Д ткаенините и ги класифицирал 3Д ткаенините во четири различни категории (таб. 2. 3): цврсти, шупливи, школка и нодални, (Chen, 2007).

Табела 2. 3 3Д ткаени текстилни структури (Chen, 2007)
Table 2. 3 3D textile structures and weave architectures (Chen, 2007)

Структура/ Structure	**Структура/ Structure**	**Форма/ Shape**
Цврста/ Solid	Повеќеслојна/ Multilayer Ортогонална/ Orthogonal Испреплетена под агол /Angle Interlock	Сложена структура, со регуларна или конусна геометрија/ Compound structure, with regular or tapered geometry
Шуплива/ Hollow	Повеќеслојна/ Multilayer	Нерамни површини, рамни површини и тунели на различно ниво во повеќе насоки/ Uneven surfaces, even surfaces, and tunnels on different level in multi-directions
Школка/ Shell	Еднослојна/ Single layer Повеќеслојна/ Multilayer	Повеќеслојни сферични школки и школки во вид на отворена кутија/ Multilayer Spherical shells and open box shells
Нодална/ Nodal	Повеќеслојна/ Multilayer Ортогонална/ Orthogonal Испреплетена под агол/ Angle Interlock	Тубуларни јазли и цврсти јазли/ Tubular nodes and solid nodes

Во однос на технологијата, сите специфични процеси од текстилната индустрија може да се користат за производство на комплексни структури, а како резултат на нивните карактеристики и геометријата на зајакнувачкиот материјал,

може да се добијат производи со различни својства наменети за различни апликации. За добивање на текстилните зајакнувачки структури можат да се користат сите процеси на производство кои се користат во текстилната индустрија како: ткаење, плетење и процесите за добивање на позаментериски материјали и неткаен текстил (Ćunko и Pezelj, 2003). При изборот на специфичен технолошки процес неопходно е во предвид да се земаат геометријата на текстилниот материјал, карактеристиките на материјалот и неговото однесување (димензионалната стабилност, механичката јачина, драперливоста, формабилноста, итн.), како и неговата соодветност за процесирање во композити и нивната апликативност. Во Табела 2. 4 е претставена компаративна анализа на различни производни техники во однос на насоката на предивото и начинот на формирање на текстилната структура (Sondhelm, 2000).

Табела 2. 4 Споредба помеѓу различните техники за производство на текстилен материјал, (Sondhelm, 2000)
Table 2. 4 A comparison among different production techniques of textile material, (Sondhelm, 2000)

Тип на текстилна структура/ Type of textile structure	**Насока на предивата/ Direction of yarn introduction**	**Начин на формирање на текстилната структура/ Fabric formation principle**
Ткаенина/ Weaved fabric	Две (0°/90°) (основа или јаток)/ Two (0°/90°) (warp and weft)	Со преплетување/ Interlacing
Плетенина/ Knitted fabric	Една (0°/90°) (основа или јаток)/ One (0°/90°) (warp or weft)	Со плетење/ Interloping
Позаментериски материјали/ Braiding	Една (правец на машината)/ One (machine direction)	Процеси за добивање на позаментериски материјали/ Braiding
Неткаен текстил/ Nonwoven	Три или повеќе (ортогонална)/ Three or more (orthogonal)	Взаемно поставување на влакната/ Mutual fiber placement

Клучни критериуми за избор на текстилните претформи за производство на структурни композитни материјали се: (а) способноста за мултиаксијално зајакнување, (б) зајакнување во попречен правец и (в) способноста за производство на обликувана форма. Во зависност од барањата за обработка и крајната апликација, само некои или сите наведени карактеристики се задолжителни.

2.4 Влакна кои се користат за комплексни текстилни структури (Fibers used for complex textile structures)

Во последниве години, текстилни структури изработени од влакна со високи перформанси наоѓаат се поголема примена во композитната индустрија. Освен економските предности, технологиите за производство на текстилни претформи, исто така, обезбедуваат хомогена дистрибуција на матрицата и зајакнувачките влакна. Оваа технологија е од особена важност во контекст на подобрување на одредени својства на композитните материјали како интер-ламинарното смолкнување и толеранцијата на штета, како и намалувањето на производните трошоци (Ko и Du, 1998).

Текстилната индустрија ја има потребната технологија за ткаење на мултифиламентни влакна со високи перформанси (стакло, арамид и јаглерод) во различни видови на претформи, кои се одликуваат со висока јачина на истегнување, модул и отпорност на хемикалии и топлина. Методот на производство на текстилната претформа, влијае врз опсегот на ориентација на влакната и волуменскиот удел на влакната во претформата, што последователно се рефлектира врз инфилтрацијата на матрицата и консолидацијата.

Главни фактори кои се одговорни за масовно производство на текстилните композити се брзината на производството, лесното ракување со материјалот и флексибилноста во дизајнот на текстилните зајакнувачки претформи. Со ова се отвора ново поле за техничка апликација на материјалите произведени од текстилната индустрија (Shishoo, 1997).

Основен зајакнувачки елемент е единичното влакно или филаментот. Примената на влакната како зајакнувачи во многу инженерски апликации, се должи на можностите за дизајнирање на композитни материјали со различни својства преку промена на распоредот на различните влакна. Влакната претставуваат значајна форма на материјал и често пати поседуваат својства кои се супериори во однос на истиот материјал во невлакнеста форма. Финоста од редот на 10 микрони им овозможува голема флексибилност. Формата на влакната со должина од неколку десетици реда на величини поголема во однос на дебелината ја детерминира преферентната апликација за оптоварување на

затегање во аксијален правец. Токму во таквите апликации до полн израз доаѓа бенефитот од користењето на влакната како технички материјали. Но, не сите видови на влакна може да се користат како зајакнувачи кај текстилните композити (Carlson, 1995). За да може влакната да се применат во композитните материјали тие треба да поседуваат специфични својства како на пример: висок модул на еластичност, висока јачина, униформен напречен пресек, мала варијација на својствата помеѓу индивидуалните влакна, како и способност да ги издржат процесите на преработка без значителна загуба на нивните својства (Fung и Hardcastle, 2001). Денес на пазарот веќе постои нова генерација на високоперформансни влакна кои се одликуваат со висока јачина и модул и кои пред сè, се наменети за технички апликации. Извонредните карактеристики техничките влакна ги должат на нивната структурна градба (Hearle, 2001). Постојат голем број на текстилни влакна кои можат да се користат како зајакнувачи, но во технологиите на современите композити доминираат: стаклените, јаглеродните и арамидните влакна (Mathews и Rawlings, 1994).

Во Табела 2. 5 се дадени некои механички карактеристики на најчесто користените зајакнувачки влакна за изработка на композитни материјали (SP Systems Guide to Composites, 2018). Тие имаат супериорна механички карактеристики, кои може да ги задоволат специфичните барања на современите композитни апликации. Секое влакно има свои предности и недостатоци.

Со цел да се направи правилен избор на материјал за добивање на современи композити потребно е да се направат истражувања за карактеристиките и својствата на поединечните влакна, нивните предности и недостатоци се со цел да се направи компарација преку која ќе се изврши селекција на соодветен материјал кој ќе ги исполни барањата во однос на дизајнот, својствата и функционалноста на композитниот материјал.

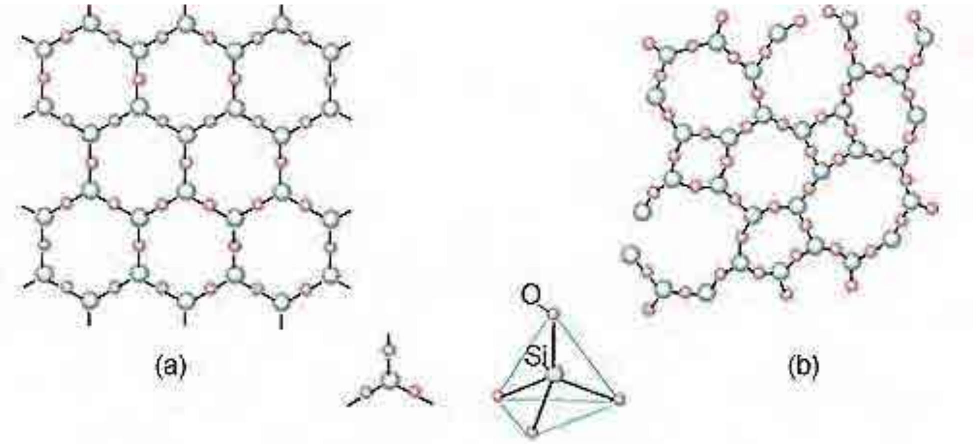
Табела 2. 5 Механички карактеристики на некои зајакнувачки влакна, (SP Systems Guide to Composites, 2018)
Table 2. 5 Mechanical characteristics of some reinforcing fibers, (SP Systems Guide to Composites, 2018)

Тип на влакно/ Type of fiber	Јачина на истегнување Tensile straight (MPa)	Модул на истегнување/ Tensile Modulus (GPa)	Густина/ Density (g/cm^3)	Специфичен модул/ Specific Modulus (GPa)
Јаглерод - стандарден/ Carbon - standard (HS)	3500	160 - 270	1,8	90 - 150
Јаглерод со среден модул/ Carbon with intermedium mod. (IM)	5300	270 - 325	1,8	150 - 180
Јаглерод со висок модул/ Carbon with high module (HM)	3500	325 - 440	1,8	180 - 240
Јаглерод со ултрависок модул/ Carbon with with ultra high module (UHM)	2000	440+	2,0	200+
Арамид со низок модул/ Aramid with a low module (LM)	3600	60	1,45	40
Арамид со висок модул/ Aramid with high module (HM)	3100	120	1,45	80
Арамид со ултрависок модул/ Aramid with ultra high module (UHM)	3400	180	1,47	120
E - Стакло/ E - Glass	2400	69	2,5	27
S - 2 - Стакло/ S - 2 -Glass	3450	86	2,5	34
Стакло - кварц/ Glass - quartz	3700	69	2,2	31

2.5 Стаклени влакна (Glass fibers)

Стаклените влакна се познати со векови, но нивната корисна примена се до средината на деветнаесеттиот век, била многу мала и ограничена. Комерцијално производство на континуирани стаклени влакна започнало во САД во 1937 година од страна на компанијата позната како Овенс – Коринг (Owens - Corning Fiberglass Cooperation). Основа на текстилните типови на стаклени влакна е силициумот, SiO_2. Во чиста форма тој егзистира како полимер, $(SiO_2)n$. Нема

вистинска точка на топење, но омекнува на 1200 °C кога почнува и да се разградува. На температура од 1713 °C, повеќето од молекулите можат слободно да се движат. Ако стаклото се екструдира и лади брзо на оваа температура, не е возможно да се формира подредена структура. Во полимерот, тој формира SiO_4 групи кои се конфигурирани како тетраедар со силициумовиот атом во центарот и четирите кислородни атоми на ќошевите, (Слика 2. 3). Стаклените влакна се аморфни бидејќи ориентацијата на тетраедарите еден во однос на друг е хаотична. Кислородните атоми на ќошевите од тетраедарите се заеднички за два соседни тетраедари. На тој начин целокупната хемиска композиција се состои од SiO_2^- (Wallenberger, 1995).



Слика 2. 3 Молекулска структура на стакло составена од атоми на кислород и силициум

Figure 2. 3 Molecular structure of glass composed of oxygen and silicon atoms

Стаклените влакна се добиваат со конверзија на различни суровини (воглавно боросиликати) на висока температура во една хомогена смеса, а потоа следи преработка на оваа смеса во стаклени влакна. Стартните суровини за производство на стаклените влакна се силициумов песок со додаток на различни количини на фелдспат, натриум сулфат, анхидриден боракс, борна киселина, вар, магнезит каолин глина и многу други материјали.

Во зависност од крајната апликација, стаклените влакна се произведуваат во три форми и тоа:

1. Стаклена волна;
2. Штапелни (кратки) влакна;
3. Континуирани (долги) влакна;

Оригиналната примена на стаклената волна (исто така позната како минерална или базалт волна) е за топлинска изолација. Составот на камената волна варира во зависност од географскиот извор на базалтовиот материјал. Иако во моментов постојат здравствени проблеми поврзани со нејзината употреба, поради бројот на многу мали по дијаметар влакна, сепак овој материјал сѐ уште се користи низ целиот свет за различни намени, пред сѐ како високотемпературен термоизолационен материјал. Штапелните (кратки) влакна најпрво се применувале за филтрација, а денес пред сѐ се користат за производство на мат-структури, додека континуираните (долги) влакна се користат за добивање на различни видови на текстилни структури.

2.5.1 Типови на стаклени влакна (Types of glass fibers)

Генерално, стаклените влакна се поделени во две категории и тоа:

1. **Обични евтини влакна**, за општа намена и
2. **Премиум влакна**, за специјална намена

Над 90 % од сите стаклени влакна се за општа намена. Овие влакна, исто така, се познати под ознаката E – влакна и се предмет на ASTM спецификацијата (ASTM). Голем број на стаклени влакна имаат ознака со буква која е тесно поврзана со нивните посебни својства и крајната апликација (таб 2. 6). Некои видови на стаклени влакна се познати под своите трговски имиња, но сите видови не се предмет на ASTM спецификацијата (Gupta, 1988).

Табела 2. 6 Типови на стаклени влакна
Table 2. 6 Types of glass fibers

Ознака Letter Designation	**Својство/ Property**
E, Електрично – отпорно/ Electrical	Ниска електрична спроводливост/ Low electrical conductivity
S, Јачина / Strength	Голема јачина/ High strength
C, Хемиски отпорно/ Chemical	Висока хемиска отпорност/ High chemical durability
M, Модулно/ Modulus	Висока цврстина/ High strength
A, Алкално/ Alkali	Висока алкалност/ High alkali
D, Диелектрично/ Dielectric	Ниска диелектрична константа/ Low dielectric constant

2.5.1.1 Обични евтини влакна, за општа намена (General - purpose glass fibers)

Е- стаклени влакна – самиот назив потекнува од нивната првобитна намена како зајакнувач за електрични апликации. На собна температура Е - стаклата имаат многу голема електрична отпорност. Хемиската издржливост на овие стакла во кисели раствори е одлична и ја надминува постојаноста на повеќето нерѓосувачки челици во киселини кои содржат хлорни јони. Основни оксиди кои се користат за добивање на овие стакла се силициум диоксид, калциум оксид и алумина. Два општи типа на Е - стаклени влакна се познати на пазарот денес. Обичното Е - стаклено влакно кое содржи 4 - 6 % теж. бор оксид. Строгите закони за заштита на животната средина бараат да се елиминира емисијата на бор при процесите на топење на стаклото и алтернативно, се бара примена на Е - стаклени влакна без бор. Како резултат на ова, од страна на компанијата Овенс – Коринг (Owens Corning Corporation) на пазарот е пласирано безборно Е - стакло познато под трговското име Advantex. Овие стакла имаат дури и поголема хемиска издржливост во кисели раствори во споредба со Е - стаклата кои содржат бор, но исто така, имаат и повисока температура на топење. Заради одличната хемиска постојаност, особено во кисела средина, тие формираат посебна подкласа на Е - стакла наречени ECR - хемиски отпорни Е – стакла (Bagherpour, 2012). Без разлика на која класа припаѓаат сите Е - стаклени влакна се за општа намена бидејќи нудат добра јачина при ниска цена, што е главна причина за нивната широка примена. Во Табела 2. 7 е даден составот на некои видови комерцијални стаклени влакна.

2.5.1.2 Премиум влакна, за специјална намена (Special - purpose fibers)

Премиум влакната, за специјална намена се од големо комерцијално значење за денешниот пазар. Во оваа категорија спаѓаат стаклените влакна со висока отпорност на корозија (ECR - стакло), влакната со голема јачина (S-, R- и Te - стакло) и со ниска диелектрична константа (D - стакло) и чистиот силициум или кварцните влакна кои се користат при ултра високи температури. Други влакна за специјална намена се: А - стакло, С - стакло, бикомпонентните влакна и др. (Wallenberger, 1999).

ECR - влакна со висока отпорност на корозија која е детерминирана од нивната хемиска структура. Овие влакна нудат долгорочна отпорност на корозија и краткорочна алкална отпорност. Трошоците за производство на овие влакна се високи, со оглед на фактот што се потребни дополнителни количини на ZnO и TiO_2 кои се релативно скапи оксиди.

Влакна со голема јачина (S-, R- и Te - стакло) - обично содржат релативно поголеми количини на SiO_2 во споредба со другите видови на стаклени влакна. Овие стаклени влакна имаат многу повисока температура на топење во споредба со конвенционалните Е - стаклени влакна. Исто така, имаат за 10 - 15 % повисока јачина од Е - стаклените влакна на собна температура, но нивната вистинска употребна вредност е способноста да издржат многу високи температури. Овие влакна, генерално, се користат за воени апликации.

Постојат голем број на ознаки за овие видови на стаклени влакна со различни степени на зголемена јачина на истегнување. Стаклените влакна со највисока јачина на истегнување (за околу 50 % повисока во однос на стандардните Е - стаклени влакна) се познати како S - 2 стаклени влакна. S - 2 стаклените влакна имаат значително поголема содржина на силициум, алуминиум и магнезиум оксид од Е – стаклените влакна. Се добиваат со топење на смесата во специјални печки со мал волумен на многу високи температури. Самиот процес е релативно скап и поради тоа исклучиво се користат за специјални апликации каде се бара многу висока термичка издржливост и задржување на јачината. R стаклените влакна имаат помала јачина на истегнување во споредба со S - 2 стаклените влакна.

За карактеризација на овие стаклени влакна исто така се користи и терминот **високо перформанси стаклени влакна.** Производителите континуирано работат на изнаоѓање на нови рецептури за производство на нови видови на стаклени влакна со подобрени својства (Димески и Сребренкоска, 2014).

2.5.2 Хемиски својства (Chemical properties)

Ако се земе во предвид фактот дека секој оксид кој влегува во состав на стаклото има свој придонес кон одредена карактеристика на стаклените влакна, врз база на хемискиот состав на стаклото, односно тежинскиот процент во составот, може да се суди за придонесот на дадениот оксид врз севкупните карактеристики на стаклените влакна. Така на пример, SiO_2 се одликува со многу мала термичка експанзија, додека Na_2O, K_2O – со висока експанзија и со слаба отпорност на дејството на водата. CaO, MgO – се со подобра постојаност на дејството на водата, киселините и базите. Заедничко за сите стаклени влакна, од аспект на хемиските својства е дека стаклото не се распаѓа, не фаќа мувла, не поддржува раст на бактерии и многу малку апсорбира влага.

Во Табела 2. 7 се дадени оксидните компоненти и нивната процентуална застапеност кај некои видови комерцијални стаклени влакна. За секоја оксидна компонента постои ранг на вредности бидејќи секој производител, па дури и различни производствени погони на иста компанија, може да користат различни композиции за еден ист тип на влакно. Овие разлики главно се резултат на разликите во расположливите суровини. Сепак, неопходно е да се одржува строга контрола во рамките на производствените капацитети за да се оптимизира конзистентност во составот и да се зголеми производствената ефикасност. Како што е прикажано во Табела 2. 7 , составот на Е - стаклените влакна кои содржат бор значително се разликува во однос на составот на Е - стаклените влакна без бор (Miller, 1987 и Sproull, 1985). Содржината на SiO2 за комерцијалните Е - стаклени влакна со бор се движи од 52 - 56 теж. %, додека кај Е - стаклените влакна без бор од 59 - 61 теж. %. Е - стаклените влакна со бор вообичаено содржат од 12 - 15 теж. % Al_2O_3 и 21 - 23 теж. % CaO, додека Е стаклените влакна без бор содржат 12 - 13,5 теж. % Al_2O_3 и 22 - 23 теж. % CaO.

Содржината на магнезиум оксид кај Е - стаклените влакна со бор се движи од 0,4 теж. % до 4 теж. %, ако магнезиум (доломит) е намерно додаден. Содржината на бор оксид се движи од 5 - 6 теж.%. Е - стаклените влакна без бор, пак содржат 3,1 - 3,4 теж. % MgO и не содржат бор оксид. TiO_2 пак е застапен со 0,4 - 0,6 теж.% кај Е - стаклените влакна со бор и со 0,5 - 1,5 теж. % кај Е - стаклените влакна без бор.

Табела 2. 7 Состав на некои видови комерцијални стаклени влакна
Table 2. 7 Compositions of commercial glass fibers

Влакно/ Fiber	**Обични влакна/ General - purpose fibers**												
	Состав, теж. % / Composition, wt. %												
	SiO_2	**B_2O_3**	**Al_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**ZnO**	**TiO_2**	**Zr_2O_3**	**Na_2O**	**K_2O**	**Li_2O**	**Fe_2O_3**	**F_2**
Е стакло со бор/ Boron containing E - glass	52 - 56	4 - 6	12 - 15	21 - 23	0,4 - 4	.....	0,2 - 0,5	.....	0 – 1	траги/ trace	.....	0,2–0,4	0,2-0,7
Е стакло без бор / Boron-free E - glass	59,0	.....	12,1	22,6	3,4	.....	1,5	.....	0,9	.....	.....	0,2	.....
Влакно/ Fiber	**Премиум влакна/ Special - purpose fibers**												
	Состав, теж. % / Composition, wt. %												
	SiO_2	**B_2O_3**	**Al_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**ZnO**	**TiO_2**	**Zr_2O_3**	**Na_2O**	**K_2O**	**Li_2O**	**Fe_2O_3**	**F_2**
ECR - стакло/ ECR - glass	58,2	.....	11,6	21,7	2,0	2,9	2,5	.....	1,0	0,2	.....	0,1	траги/ trace
D - стакло/ D - glass	74,5	22,0	0,3	0,5	.....	.....	.....	.....	1,0	< 1,3	0,1	.....	.....
S-, R- и Te - стакло/ S-, R-, and Te - glass	60 - 65,5	.....	23 - 25	0 - 9	6 - 11	.....	.....	0 - 1	0 - 0,1	.....	.....	0 - 0,1	.....
Силициум (кварц)/ Silica (quartz)	1, 2	99,999	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

ASTM стандардите за стаклените влакна ги покриваат сите варијанти на комерцијални Е- стаклени влакна кои се разликуваат во однос на крајната апликација. Е- стаклените влакна кои содржат од 5 - 10 теж. % бор оксид се користат за печатени кола и воздушни апликации, додека составите кои содржат од 0 - 10 теж. % бор оксид се сертифицирани за општа примена. Според овие стандарди, Е - стаклените влакна за било кој тип на апликација, исто така, може да содржат од 0 - 2 теж. % на алкален оксид и од 0 - 1 теж. % флуор. Поновите варијанти на Е- стаклени влакна без бор можат и да не содржат флуор во својот состав.

2.5.3 Механички и физички својства (Mechanical and physical properties)

Механичките и физичките својства на некои видови комерцијални стаклени влакна се претставени во Табела 2. 8 (Wallenberger et al., 2001). Според Табела 2. 8, температурата на формирање на Е - стаклените влакна со бор се движи од 1160 - 1195 °C, додека температура на течење од 1065 - 1077 °C. Спротивно кај Е - стаклените влакна без бор температурата на формирање се движи од 1250 - 1264 °C, додека температура на течење од 1146 - 1180 °C. Точката на омекнување на Е - стаклените влакна со бор се движи од 830 - 860°C, додека за Е- стаклените влакна без бор е околу 916 °C.

Генерално, температурата на формирање на растопите на Е - стаклените влакна без бор се за околу 100 до 110°C повисоки во споредба со растопите на Е- стаклените влакна со бор. Исто така, температурата на омекнување на Е - стаклените влакна без бор се за околу 60 до 90 °C повисоки во однос на Е- стаклените влакна со бор. Повисоките процесни температури бараат повеќе енергија, но повисоките точки на омекнување овозможуваат примена на повисоки температури (Wallenberger, 2010).

Модулот, како и јачината на истегнување на стаклените влакна зависат од хемиската композиција на влакната и микроструктурните карактеристики. Микроструктурните карактеристики можат да бидат индуцирани од условите на извлекување, термичката историја, ефектите на средината и од оние услови кои предизвикуваат површински дефекти.

Табела 2. 8 Механички и физички својства на некои видови комерцијални стаклени влакна
Table 2. 8 Mechanical and physical properties of commercial glass fibers

Својство/ Property	**Обични влакна/ General purpose fibers**		**Премиум влакна/ Special purpose fibers**			
	Е стакло со бор/ Boron containing E-glass	**Е стакло без бор/ Boron free E-glass**	**ECR - стакло/ ECR-glass**	**D - стакло/ D - glass**	**S-, R- и Te - стакло/ S-, R- and Te-glass**	**Силициум (кварц)/ Silica (quartz)**
Температура на формирање на °C/ Forming temperature °C	1160 – 1196	1250 - 1264	1213	.....	1565	>2300
Температура на течење °C/ Liquidus temperature °C	1065 – 1077	1146 -1180	1159	.....	1500	1670
Температура на омекнување °C/ Softening temperature °C	830 – 860	916	880	770	1056	.....
Температура на истегнување °C/ Straining temperature °C	616	691	691	475	760	.....
Густина g/cm^3/ Density, g/cm^3	2,54 – 2,55	2,62	2,66 – 2,68	2,16	2,48 – 2,49	2,15
Коефициент на линеарна експанзија 10^{-6}/°C / Coefficient of linear expansion, 10^{-6}/°C	4,9 – 6,0	6,0	5,9	3,1	2,9	0,54
Специфична топлина, cal/g/°C/ Specific heat, cal/g/°C	0,192	.....	.....	0,175	0,175	.....
Диелектрична константа на собна темп. и 1MHz / Dielectric Constant at room temp. and 1 MHz	5,86 – 6,6	7,0	.....	3,56– 3,62	4,53 – 4,6	3,78
Диелектрична јачина, kV/cm/ Dielectric strength, kV/cm	103	102	.....	.....	130	.....
Индекс на рефракција, n_o / Refractive Index, n_o	1,547	1,560	1,576	1,47	1,523	1,4585
Загуба на тежина за 24 ч. во 10% H_2SO_4, %/ Weight loss in 24 h in 10% H_2SO_4, %	~ 41	~ 6	5	.....	.....	.....
Јачина на истегнување на 23°C,GPa/ Tensile strength at 23 °C, GPa	3,1 – 3,8	3,1 – 3,8	3,1 – 3,8	2,4	4,38 – 4,59	3,4
Јунгов модул, GPa / Young's modulus, GPa	76 – 78	80 – 81	80 – 81	.....	88–91	69
Издолжување при прекин, %/ Filament Elongation at break, %	4,5 – 4,9	4,6	4,5 – 4,9	.....	5,4-5,8	5

Стаклените влакна се класифицирани во три групи од страна на Khazanov со соработниците, (Khazanov et al.,1995)

1. Влакна со висока јачина (5 - 7 GPa) произведени од кварц или S - 2 стаклени влакна;

2. Влакна со средна јачина (2,5 - 3 GPa) со алуминосиликатен состав;

3. Влакна со мала јачина (1 - 2 GPa) произведени од борат, фосфат и мулти алкални стакла.

При термички третман, стаклените влакна покажуваат намалување на јачината. Кварцните стакла се најотпорни, бидејќи покажуваат промени само над 600 °C, додека боратните стакла покажуваат линеарна деградација на јачината дури и на температури пониски од 200°C. Јунговиот модул на типичните стаклени влакна е од редот 70 - 80 GPa, додека на премиум влакната се движи од 80 - 91 GPa. Модулот на еластичност на E - стаклените влакна без бор е за околу 5 % повисок во однос на E- стаклените влакна со бор (Eastes et al.,1998 и Rossi et al., 1997). Модулот на стаклените влакна се намалува со намалувањето на јачината и силите на хемиските врски во тродимензионалната мрежа, како и со внесување на модификатори во мрежата, како што се алкални елементи или нивни оксиди. Покрај од составот, јачината на истегнување во голема мера зависи и од присуството на дефекти и недостатоци во структурата. За типично E - стаклено влакна јачината на истегнување е околу 3,5 GPa. Стаклените филаменти добиени од стакло со состав од чист SiO_2, имаат јачина на истегнување од околу 7 GPa. Со воведување на алкални модификатори во мрежата јачината на истегнување на влакната може да се намали до околу 2,5 - 3 GPa. Борните, фосфатните и оловните силикатни стакла обично имаат јачина од околу 1 - 2 GPa.

При тестирање на отпорноста на корозија на собна температура во сулфурна киселина пронајдено е дека E - стаклените влакна без бор има за седум пати повисока отпорноста на корозија споредено со E- стаклените влакна со бор. Густината на E - стаклените влакна без бор (2,62 g/cm^3) е незначително повисока во однос на E - стаклените влакна со бор (2,55 g/cm^3), но сепак густината на двата типа на E - стаклени влакна е помала од густината на ECR стаклените влакна (2,66 – 2,68 g/cm^3) кои се специјално наменети за отпорност на корозија.

Исто така, безборните Е - стаклените влакна имаат повисок индекс на рефракција и коефициент на линеарна експанзија отколку Е - стаклените влакна со бор.

2.5.4 Статички замор на стаклените влакна (Static fatigue of glass fiber)

Е - стаклените влакна во присуство на влага, под оптоварување имаат намален животен век. Меѓутоа во присуство на посериозни деградирачки средини, обично при ниски pH вредности, може да бидат индицирани кршливи пукнатини. Ова се нарекува напукнување од еколошка корозија (ESCC - environmental stress corrosion cracking). Во алкални средини брзината на корозија е релативно мала, така што феноменот кој се забележува најчесто потекнува од корозија предизвикана од напрегање, отколку од напукнување од еколошка корозија (ESCC).

Стаклените влакна страдаат од временска зависност на фрактурата под дејство на оптоварување (Aveston et al., 1980; Jones, 2003). Статичкиот замор е всушност појава на корозија. Водата претставува реактивен реагенс и само во висок вакуум отсуствува зависноста на јачината од времето. Статичкиот замор на стаклените влакна го одредува животниот век на кој било композитен материјал направен на база на стаклени влакна. Во композитниот материјал, каде што смолата се користи како врзивно средство, брзината на дифузија на влагата ќе биде фактор на контрола на животниот век на структурата, поради заштитата што ја дава добро врзаната матрица. Исто така, важно е да се обезбеди добра атхезија помеѓу матрицата и стаклените влакна во присуство на влага, во спротивно капиларното дејство поврзано со лошата меѓу гранична површина ќе доминира во процесот на кршење. Оштетувањето на меѓу граничната површина не значи дека може да дојде до кршливи пукнатини, туку може само во голема мера да ја намали јачината на композитниот материјал.

2.5.5 Финиширање (Sizing)

Стаклените филаменти се многу абразивни едни со други. Заради тоа, пред да се соберат во снопот, поединечните филаментите се „омастуваат“ т.е. на површината им се нанесува облога или филм (финиш) која ќе ја спречи интер - филаментната абразија и абразијата со деловите на машини низ кои поминуваат влакната во наредните фази на преработка. Абразијата ги оштетува влакната

што последователно негативно се одразува врз нивните механички карактеристики. Покрај оваа, финишот има и врзивна улога со што ги држи влакната заедно во снопот.

Финиширањето може да биде привремено и перманентно. За привремено финиширање (sizing) обично се користат: емулзија скроб - масло, емулзија скроб - вода, поливинил алкохол, маснотии, восок итн., во количина од 1,5 - 3,5 % по маса. Овие емулзии имаат способност да ја апсорбираат и задржуваат влагата со што стекнуваат лубрикативни и абразивно - отпорни својства. Поради подобар ефект, овие емулзии мора да се подготват во простории со релативна влажност поголема од 55%. Привременото финиширање се врши на филаменти кои понатаму се предат во предива и потоа се процесираат (ткаат) во ткаенини. По ткаењето се врши „одмастување“ т.е. финишот термички се отстранува (запалува) со што се добива пречистена ткаенина.

Перманентниот финиш се задржува на стаклените влакна до конечна употреба односно во финалниот производ. Затоа, покрај лубрикативни и заштитни особини, тој мора да биде компатибилен со полимерот со кој влакната понатаму ќе се процесираат. Перманентниот финиш е хемиски агенс кој има двојна улога: да ги заштити филаментите од меѓусебна абразија и да послужи како интерфејс помеѓу смолата и влакното, при производството на композитни материјали. Овие агенси најчесто се врз база на поливинил ацетат, полистирен, полиакрилат, силан, полиестерски и епокси смоли. Тие се нанесуваат во количина 0,5 – 2,5 % по маса, во зависност од крајната намена.

2.5.6 Важни комерцијални продукти (Important commercial products)

Во суштина постојат два процеси за добивање на континуирани стаклени влакна: кugличен процес, кој е стар процес и од помала важност и директен процес, кој во денешно време најчесто се користи (Димески и Сребренкоска, 2014).

По производство, континуираните стаклени влакна мора да се конвертираат во соодветна форма на производи погодни за понатамошна апликација. Генерално, Е - стаклените влакна на пазарот се среќаваат во форма на: континуиран ровинг, ткаен ровинг, стаклен мат, стаклена волна, сечкани влакна и предива за текстилна апликација (Wallenberger et al., 2001).

2.5.6.1 Стаклен мат (Glass mat)

Стаклениот мат (сл. 2. 4) може да се произведува или како континуиран или како сечкан мат (CSM - Chopped Strand Mat). Сецканиот стаклен мат се состои од кратки стаклени влакна случајно распоредени едни во однос на други низ целата површина поврзани со хемиско врзивно средство, обично термопластична смола со различен опсег на растворливост во стирен, во зависност од апликацијата. Континуираниот мат се произведува на сличен начин, но без сечкање и вообичаено е потребна помала количина на врзивно средство поради зголеменото механичко преплетување, кое обезбедува одреден инхерентен интегритет. Континуираниот мат наоѓа примена во процесите на пресување во калап или како дополнителен производ во унидирекционалните процеси како што е пултрузијата, каде што е потребна одредена попречна јачина.

Слика 2. 4 Стаклен мат
Figure 2. 4 Glass mat

2.5.6.2 Стаклен ровинг (Fiberglass roving)

Стаклениот ровинг (сл. 2. 5 а) се добива со спојување на повеќе снопови на невпредени филаменти или кабелни предива во едно кабелно предиво кое е намотано во стабилен цилиндричен пакет. Овој процес е познат како multiend ровинг процес. Во зависност од бројот на снопови споени меѓу себе постојат различни класи на ровинзи. Овој број се движи од 6 до 120, додека најчест број на снопови кои се спојуваат е 60. Така ровингот од 60 снопови е изграден од 12240 (60 x 204) индивидуални филаменти. Дијаметарот на секој филамент во ровингот е ист и вообичаено се движи од 13 - 24 μm. Ровинзите, исто така, можат да имаат различна тежина, додека финоста вообичаено е во рангот од 300 - 4800

tex. Ровинзите наоѓаат широка примена во многу апликации: За да се исполнат барањата на различни процеси постојат различни типови на ровинг и тоа: ровинзи за сечкање (ровинг за распрскување, ровинг за мат, ровинг за листови и панели, брикетен ровинг) и ровинзи за употреба во континуирана форма (ровинг за технологија на намотување на филаменти и пултрузија, ровинг за ткаење и сл.).

а) б)

Слика 2. 5 а) Стаклен ровинг б) Ткаен ровинг

Figure 2. 5 a) Fiberglass roving b) Woven roving

Ткаен ровинг или ровинг ткаенина (сл. 2. 5 б), се добива со ткаење на невпредени ровинг снопови на специјални "тешки" разбои. Во зависност од апликацијата можат да се користат различни видови на преплети. Платно и кепер преплетот нудат јачина во двете насоки. Ровинг ткаенината е подебела и потешка од стаклената ткаенина бидејќи ровингот е подебел и потежок од предивото. Се употребува кога сакаме да постигнеме максимална цврстина и крутост со минимални инвестиции. Се користи за изработка на дебели ламинати и големи тешки делови како што се чамци, оклопи итн.. Релативно е евтин во однос на други производи од континуирани стаклени влакна. Како и самиот ровинг и вткаениот ровинг содржи перманентен (зајакнат) омастувач. Вткаениот ровинг е тешко свитлив заради тоа не се користи за изработка на сложени контури. После ткаењето, вткаениот ровинг може да се користи директно како бидирекционален зајакнувач бидејќи не подлежи на понатамошни обработки како стаклената ткаенина. Предностите на употреба на вткаениот ровинг се тоа што се одликува со поголема содржина на стаклени влакна по слој, нуди многу

добра ударна жилавост, погоден е за ракување при процесите на рачно положување и др.

Недостатоци на вткаениот ровинг се тоа што тешко се натопува, односно импрегнира со смола поради компактноста на филаментите во снопот, што предизвикува неадекватна атхезија меѓу филаментите. Друг недостаток му е, што се формираат воздушни меури кои лесно се "заробуваат" што овозможува зголемување на празниот простор кој е лесно подложен на дејството на вода и хемикалии.

2.5.6.3 Комбинации на мат и ткаен ровинг (Combinations of mat and woven roving)

Овие комбинации се развиени за производство на специфични производи во последниве години. Во многу процеси на положување ламинатот е изграден од слоеви на стаклен мат и ткаен ровинг. Производителите на стаклени влакна започнаа со производство на овие производи со цел да се зголеми ефикасноста на процесите. Стаклениот мат и ткаениот ровинг се поврзани заедно или со хемиско врзивно средство или сошиени заедно.

2.5.6.4 Предива за текстилна апликација (Yarns for textile applications)

Сноп од стаклени филаменти не е погоден како таков за употреба, бидејќи има мала механичка цврстина и не е униформен. Затоа прва фаза при производството на стаклени ткаенини по сушење на бобината е впредувањето. Впредувањето е неопходно за да се постигне униформност и поголема цврстина на финалниот производ. Впредувањето се врши во предилници со примена на таканаречени спин машини (машини за впредување) при што на сноп на паралелни филаменти му се даваат одреден број на завои на единица должина. Два типа на впредување кои нормално се користат се познати како Z (впредување на десна страна) и S (впредување на лева страна). Постојат различни конструкции на стаклени предива со различни карактеристики. Начесто се користи впредување на десна страна со број на завои од 28 - 60.

Широкиот спектар на предива од стаклени влакна бара точна номенклатура на системот за идентификација. Денес во светот се користат два системи за идентификација на стаклените предива, американски US - систем и европски

TEX - систем. Номенклатурата и во двата система се состои од два основни дела - алфабетски и нумерички.

Типичен пример на значење на буквите и броевите кај европскиот TEX - систем е даден во континуитет:

E	C	9	33	Z	x	2	S	130

E- електричен тил, означува состав на стаклото

C - континуирани филаменти, означува влакна со голема должина

(S - штапелни (кратки влакна), T - текстурирани),

9 - означува дијаметар на индивидуалните филаменти во µm,

33 - означува финост на снопот во текси (tex) (g/km),

Z - десна насока на завоите кај единично предиво

(S - лева насока на завоите кај единично предиво)

x 2 - знак на множење и бројот зад него означува број на снопови во финалното предиво. Ако овој знак не постои, тогаш се подразбира дека предивото е единично.

S - означува лева насока на впредување,

130 - означува број на завои на единица должина.

Американскиот систем на означување на предивата се разликува од европскиот по тоа што сите вредности се дадени во империјален систем и наместо броеви за означување на дијаметарот на филаментот се користат букви, чие значење е дадено во Табела 2. 9 (Wallenberger et al., 2001).

Табела 2. 9 Номенклатура на филаментите според дијаметарот
Table 2. 9 Filament diameter nomenclature

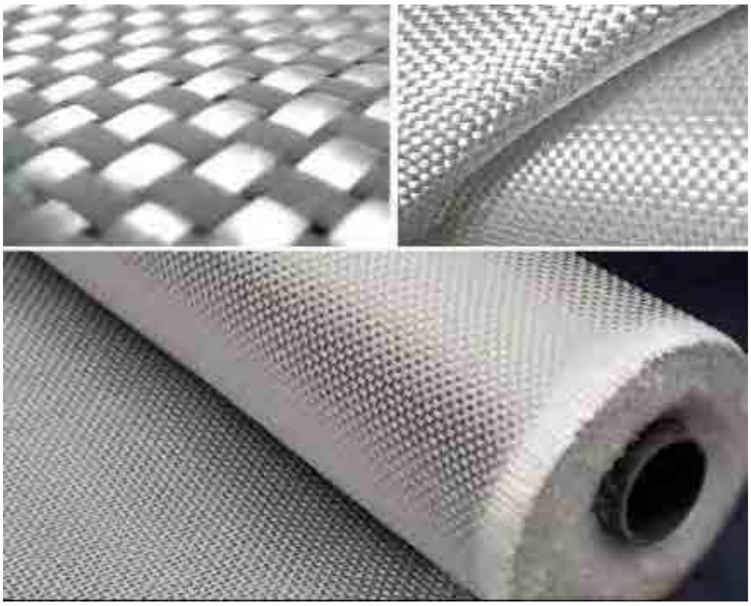
Букви/ Alphabet	Дијаметар на филаментот/ Filament diameter (μm)
AA	0,8-1,2
A	1,2-2,5
B	2,5-3,8
C	3,8-5,0
D	5,0-6,4
E	6,4-7,6
F	7,6-9,0
G	9,0-10,2
H	10,2—11,4
J	11,4-12,7
K	12,7-14,0
L	14,0-15,2
M	15,2-16,5
N	16,5-17,8
P	17,8-19,0
Q	19,0-20,3
R	20,3-21,6
S	21,6-22,9
T	22,9-24,1
U	24,1-25,4

2.5.6.5 Стаклени ткаенини (Fiberglass fabrics)

Стаклените предива се конвертираат во ткаенини со примена на конвенционалните процеси на ткаење (Loewenstein, 1993). Постојат различни конструкции на разбои кои се користат, но денес најчеста примена наоѓаат далеку побрзите, попродуктивните и посигурни пневматски разбои.

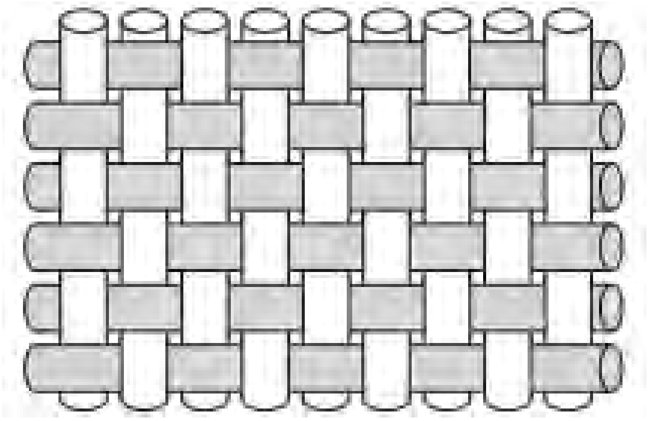
Својствата на ткаенините се окарактеризирани од својствата на стаклените предива кои се користат за основа и јаток, како и од конструкциските карактеристики на ткаенината, како што се: типот на преплетот, густината на ткаенината по основа и јаток и сл. (Škundrić et al., 2008). Заедно овие карактеристики влијаат врз перформансите на ткаенините во финалната

композитна структура како стабилноста, драперливоста, порозноста, јачината, крутоста и др. (Tan et al., 1997). Стаклените ткаенини (сл. 2.6) се произведуваат во безброј типови на преплети, но најчесто употребувани се платно, кепер, сатен (атлас) и панама преплетот (JPS Industries Inc, 2018).



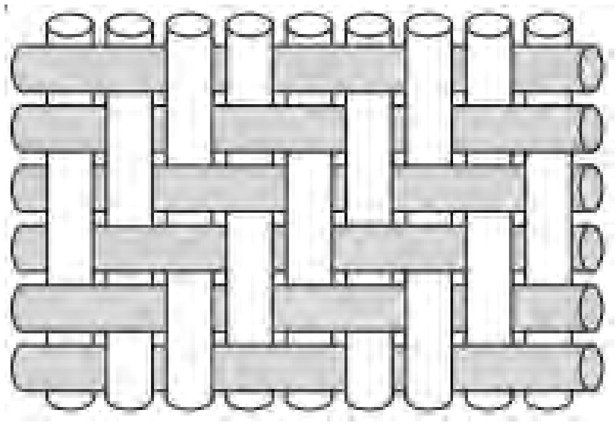
Слика 2. 6 Стаклена ткаенина
Figure 2. 6 Fiberglass fabric

Платно преплетот (сл. 2. 7) по својата конструкција е наједноставниот и најзатворениот преплет. Кај него рапортот е два, што значи дека во рапортот има вкупно четири врзивни точки од кои две се основини, а две јаточни. Жиците од еден систем наизменично се подигнуваат и спуштаат над, односно под жиците на другиот систем. Платно преплетот припаѓа на категоријата т.н. преплети со квадратна структура. Овој преплет и дава на ткаенината максимална стабилност и цврстина и униформна јачина во двата правци кога бројот на нити по основа и јаток е приближно еднаков. Во зависност од густината на ткаенината натопувањето со смола и исфрлањето на воздух е прилично добро. Недостаток му е слабата свитливост. Се користи за изработка на рамни ламинати, плочи за печатени кола, траки итн. (Антиќ et al.,1985 и Horrocks et al., 2000).



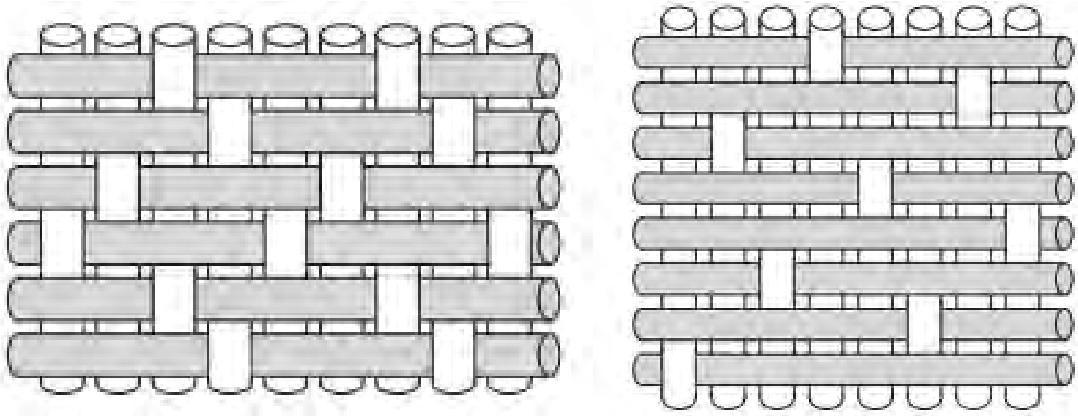
Слика 2. 7 Платно преплет
Figure 2. 7 Plain weave

Кепер преплетот (сл. 2. 8) се одликува со карактеристично меѓусебно врзување на жиците при што на ткаенината се формираат дијагонали. Оттука се среќава и називот дијагонален преплет или кепер дијагонал. Најмал рапорт на преплетот е 3, додека најголемиот може да биде неограничен, со тоа што во практиката се користат релативно мали рапорти. Насоката на дијагоналите зависи од хоризонталното и вертикалното поместување на врзивните точки и може да биде од лево на десно (Z) или од десно на лево (S), (Зафирова и Томовска, 2011). Кепер преплетот е повеќе свитлив во однос на платно и панама преплетот и се користи за изработка на ткаенини со поголема густина на ткаење. Натопувањето со смола е многу тешко. Кепер преплетот се користи при изработка на цилиндрични ламинати.



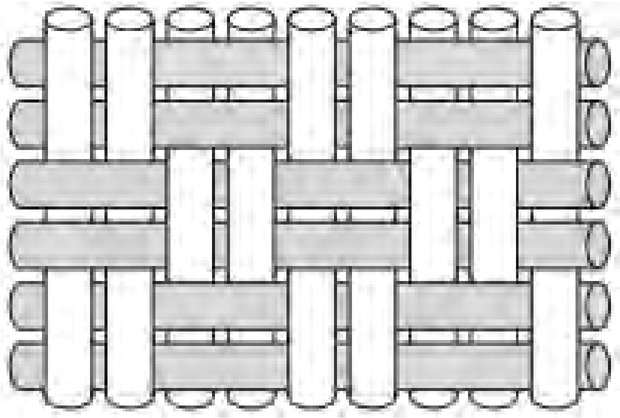
Слика 2. 8 2x2 Кепер преплет
Figure 2. 8 2x2 Twill weave

Сатен (атлас) преплет - За атлас преплетот (сл. 2. 9) карактеристично е тоа што врзивните точки меѓусебно не се допираат, но се правилно распоредени, така што површината на ткаенината е глатка и рамномерна. Во зависност од тоа кој систем на жици флотира на лицето на ткаенината, се разликуваа јаточен атлас (сатен) и основин атлас (атлас). Кај јаточниот атлас (tp > to), а кај основиниот атлас (to > tp). Според бројот на жици во рапортот, атласот се нарекува петожични, осможични итн.. Најмал рапорт на атлас преплетот е петожичниот. Се одликува со голема цврстина и мала стабилност и тешкотии во отстранување на воздухот. Најгуст е од сите преплети и најмногу свитлив. Особено е погоден за формирање на сложени контури во авионската индустрија.



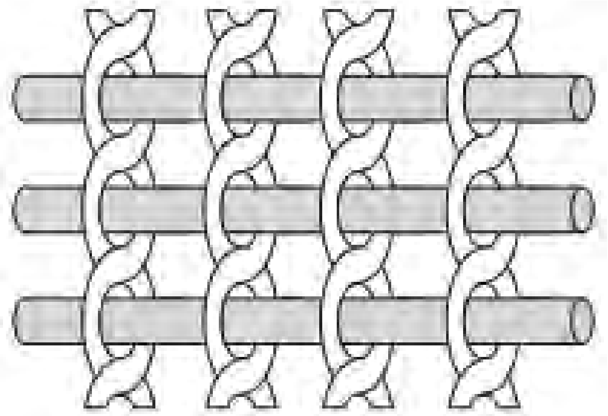
Слика 2. 9 а) Четири - жичен сатен б) Осум - жичен сатен
Figure 2. 9 a) Four - harness satin b) Eight - harness satin

Панама преплетот (сл. 2. 10) се формира од платно преплетот со истовремено зголемување на бројот на врзивни точки и во правец на основата и во правец на јатокот, односно наместо една нита, две или повеќе нити по основа и две или повеќе нити по јаток, алтернативно, се преплетуваат едни под и над други. Ткаенините во панама преплет се помеки, појаки и имаат поголема еластичност, но помала стабилност во однос на ткаенините во платно преплет. Панамата, како и платно преплетот, имаат квадратна структура, поради што површината на ткаенината во панама преплетот има изглед на шаховско поле. Се користи за истата намена како и платнениот преплет.



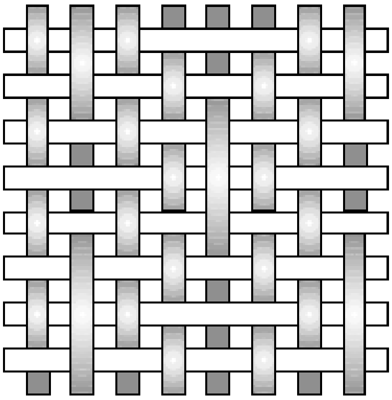
Слика 2. 10 Панама преплет
Figure 2. 10 Basket weave

Ленениот преплет (сл. 2. 11) овозможува отворена конструкција на ткаенина каде две нити по основа се свиткуваат околу една нита по јаток со што ја држи нитата цврсто на местото. Се користи за тешки, груби ткаенини кои се користат за дебели ламинати. Иако оваа е отворен преплет дисторзијата е минимална. Вообичаено се користи во комбинација со други видови на преплети бидејќи ако се користи сам неговата отворена конструкција, може да влијае врз ефективноста на композитната структура.



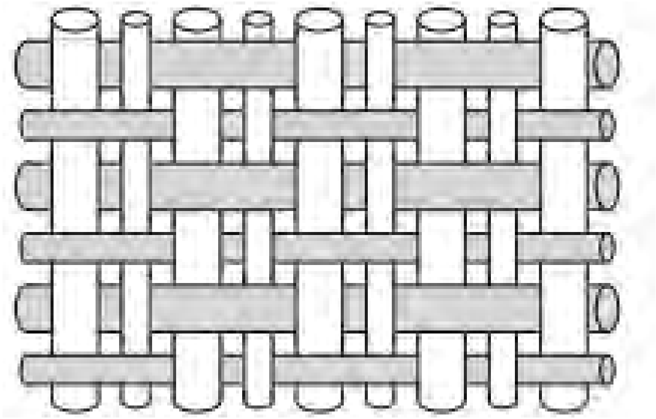
Слика 2. 11 Ленен преплет
Figure 2. 11 Leno weave

Лажен ленен (газа) преплет (сл. 2. 12) - Верзија на платно преплетот во кој повремени основини жици во регуларни интервали, но вообичаено неколку поодделни жици отстапуваат од алтернативното под - над преплетување и наместо тоа се преплетуваат на секој две или повеќе жици. Ова се случува со слична фреквенција и во правец на јатокот и крајниот ефект е ткаенина со зголемена дебелина, погруба површина и дополнителна порозност.



Слика 2. 12 Лажна газа преплет
Figure 2. 12 Mock leno weave

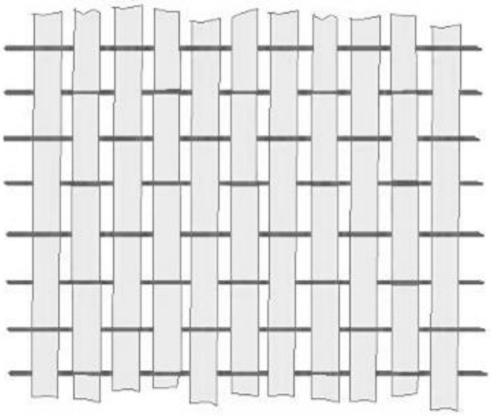
Високо модулен преплет (сл. 2. 13) - кај овој тип на преплет нема директно преплетување на јатокот и основата, туку се употребува друго предиво за нивно преплетување кое не учествува во механичките перформанси на ткаенината. Бидејќи нитите на главната основа и јаток не се преплетени ниту свиткани, предивата се релативно непроменети, а факторите на абразија и свиткување редуцирани. Со ова значајно се зголемуваат перформансите на ткаенината (отпорноста на удар и јачината). Ваков тип на преплет се применува кај ткаенините кои се користат за изработка на високоперформансни композити.



Слика 2. 13 Високо модулен преплет
Figure 2. 13 High-modulus weave

Унидирекционален преплет (сл. 2. 14). Ова е, всушност, платнен, панама или сатен преплет каде се користи поголем број жици со поголема јачина во една насока, обично во насока на основата, за разлика од јатокот каде се користи помал број на релативно послаби жици Ткаенините во ваков преплет имаат максимална јачина по основа. Унидирекционалниот преплет се користи за

изработка на цилиндрични ламинати кои се изложени на максимално оптоварување во една насока. Ламинатите на база на унидирекционални ткаенини се одликуваат со извонредна отпорност на удар.



Слика 2. 14 Унидирекционален преплет
Figure 2. 14 Unidirectional weave

Со внимателно избирање на параметрите на структурата, може да се постигнат посакуваните својства на ламинатот во однос на тежината, дебелината, јачината, цената итн..

Во Табела 2.10 е дадена споредбена анализа на својствата кај ткаенините според типот на преплетот (Ogale и Alagirusamya, 2003). Компактноста на ткаенината во главно зависи од механичкото преплетување на двата система на предива. Драперливоста, површинскиот изглед и стабилноста на ткаенината се контролирани пред се од начинот на преплетување. Површинската маса, порозноста, водоотпорноста се детерминирани преку соодветна селекција на финоста на предивата и бројот на предива на cm^2. Денес постојат повеќе од 50 различни типови на стаклени ткаенини, од најфините ткаенини со површинска маса 20 g/m^2 и дебелина од 0,025 mm кои се користат во повеќе слојната штампа, до ткаенини со површинска маса 1252 g/m^2 и дебелина 1,5 mm кои се користат за различни индустриски апликации.

Табела 2. 10 Споредба на својствата на ткаенините според типот на преплет (Ogale и Alagirusamya, 2003)
Table 2. 10 Comparison of the properties of the fabrics according to the type of weave styles (Ogale и Alagirusamya, 2003)

Својство/ Property	**Типови на преплет/ Types of weave styles**					
	Платно/ Plain	**Кепер/ Twill**	**Сатен/ Satin**	**Панама/ Basket**	**Ленен/ Leno**	**Лажен ленен/ Mock leno**
Добра стабилност/ Good stability	4	3	2	2	5	3
Добра драперливост / Good drape	2	4	5	3	1	2
Ниска порозност/ Low porosity	3	4	5	2	1	3
Мекост/ Smoothness	2	3	5	2	1	2
Баланс/ Balance	4	4	2	4	2	4
Симетрија/ Symmetrical	5	3	1	3	1	4
Ниска брановидност/ Low crimp	2	3	5	2	2/5	2

5 – одлично, 4 – добро, 3 – прифатливо, 2 – слабо, 1 – многу слабо/
5 - excellent, 4 - good, 3 - acceptable, 2 - weak, 1 - very weak

2.6 Материјал за матрица (Matrix material)

Композитните материјали можат да бидат групирани во категории врз основа на природата и типот на матрицата. Методите на изработка на композитите, исто така, се различни во зависност од физичките и хемиските својства на матрицата и на зајакнувачот (Сребренкоска et al., 2013 и Wang et al., 2011).

Како матрици кои се користат кај композитните материјали се:

- Полимерни матрици;
- Метални матрици - алуминиум, магнезиум, титаниум и други;
- Керамички матрици - глина, калциум или алуминосиликат.

Најчеста примена наоѓаат полимерните матрици бидејќи тие придонесуваат за круцијална предност на композитните материјали, пред се поради лесното производство на многу комплексни делови при релативно ниски трошоци за алат и ниски капитални инвестиции. Вообичаено, полимерната матрица во композитот е застапена со 30 - 40 % и покрај основната функција, да ја обедини дисперзираната фаза и да го сочува обликот на композитот, таа исполнува и

различни други функции. Матрицата ги поврзува компонентите на композитот, затоа термичкото однесување на композитот главно зависи од термичката стабилност на матрицата. Полимерот ги заштитува влакната, кои се обично крти и често кршливи, од абразија и корозија под дејство на надворешните влијанија. Најважното, полимерната матрица го распределува применетото оптоварување и игра улога на пренесувач на напрегањето, па така кога индивидуалните влакна попуштаат, композитната структура не ја губи својата способност и понатаму да издржува оптоварување.

При компресиони напрегања, матрицата има критична улога во заштитата на влакната од извиткување. Меѓуслојната жилавост, јачината на смолкнување, компресија и трансверзалната (попречната) јачина на композитот се исто така диктирани од матрицата. За да бидат исполнети сите овие функции, атхезијата помеѓу зајакнувачката фаза и матрицата треба да биде што поголема (Charrier, 1990 и Schwartz, 1997).

Некои својства на матрицата кои најмногу влијаат на однесувањето на композитот се (Masuelli, 2013):

- Модулот на еластичност (цврстина);
- Јачина на истегнување, на компресија, на смолкнување;
- Гранично издолжување;
- Отпорност на агресивни органски течности;
- Отпорност на кршење (жилавост) и толеранција на оштетување;
- Термичка, оксидациона стабилност и влаговпивање.

Полимерните матрици се делат на термореактивни и термопластични и во Табела 2. 11 е дадена споредбена анализа на некои од основните карактеристики на овие две групи на матрици.

Термопластичните полимерни матрици при загревање омекнуваат или се топат, а при ладење повторно се втврднуваат. Овој процес може да биде често повторуван, при што во полимерот не се случуваат никакви хемиски промени. Типични термопласти се полиамид - PA, полипропилен - PP и ABS - акронитрил бутадиен стирен. Тие се зајакнувани најчесто со кратки, сечкани влакна. Денес постојат многу видови на пластични маси, па поради тоа уште од

почетокот на проектирањето треба да се спроведат додатни испитувања кои ќе ни овозможуваат да процениме како ќе се однесуваат различните видови на термопласти во специфични услови на примена (Wolf, 2000).

Термореактивните полимерни матрици содржат молекули кои се вмрежени и при загревање не омекнуваат. Термореактивните полимерни матрици се формираат при реакција, во која смолата и вцврснувачот или смолата и катализаторот се мешаат и потоа трпат иреверзибилна хемиска реакција (Groover, 2010). Генерално, за време на процесирањето полимерот се нарекува смолен систем додека по вмрежувањето се нарекува матрица. Термореактивните смоли имаат ниска вискозност која овозможува одлична импрегнација на влакната и висока производна брзина. Термореактивните полимерни матрици се најчесто применуваниот смолен систем пред се поради нивното лесно процесирање и ниските трошоци (U.S. Congress, 1988).

Табела 2. 11 Споредбена анализа на термореактивните и термопластичните матрици
Table 2. 11 Comparative analysis of thermosetting and thermoplastic matrices

ПОЛИМЕРНИ МАТРИЦИ/ POLYMER MATRIX	
Термопластични/ Thermoplastics	**Термореактивни/ Thermosetting**
Висок степен на деформација на прелом/ High degree of deformation at break	Низок степен на деформација на прелом/ Low degree of deformation at break
Недефиниран рок на траење/ Undefined shelf life	Дефиниран рок на траење/ Defined shelf life
Можат повторно да се процесираат/ They can be re-processed	Не можат повторно да се процесираат/ They can not be re-processed
Не лепливи и лесно се управуваат/ Not sticky and easy to manage	Лепливи/ Sticky
Висока температура на процесирање/ High processing temperature	Ниска температура на процесирање/ Low processing temperature
Кратко време на процесирање/ Short processing time	Долго време на процесирање/ Long processing time

Во зависност од видот на катализаторот и реактивноста на смолниот систем циклусот на вмрежување може да варира од неколку минути до неколку часа и може да се случи на собна температура или при повисоки температури. По вмрежувањето, кое најчесто се изведува на повисоки температури, тие

стануваат крути, нетопливи и нерастворливи продукти. Кај некои термореактивни полимери, како што се фенолните смоли, се создаваат испарливи супстанци како нус производ (кондензациона реакција). Други термореактивни смоли (како што се полиестрите и епоксидите) се вмрежуваат без издвојување испарливи супстанци како нус продукт и тие се многу полесни за процесирање (адициони реакции). Еднаш вмрежените термореактивни полимери не можат да преминат повторно во течност при загревање, поради што над одредена температура нивните механички својства значително се менуваат. Оваа температура е позната како температура на стаклосување (Glass Transition Temperature - Tg). Tg варира широко за различни полимерни системи. Над Tg, молекулската структура на термореактивната смола се менува: од крут полимер поминува во пофлексибилен, аморфен полимер. Над Tg, модулот на смолата нагло опаѓа и како резултат на тоа јачината на притисок и смолкнување на композитите исто така опаѓа. Другите својства, како што се отпорност на вода и стабилност на боја, се редуцирани над Tg на смолата (Hoa, 2009).

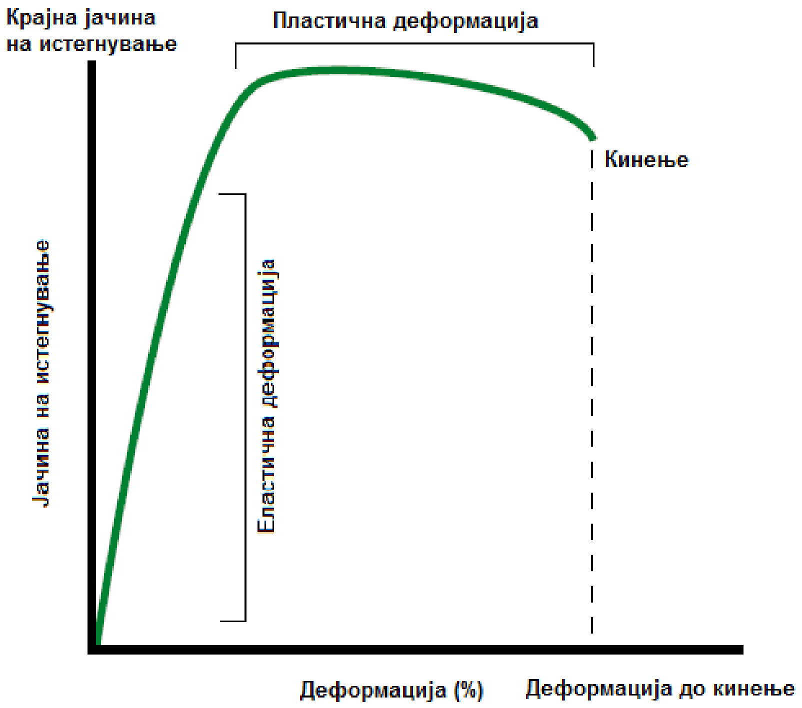
Тешко е да се категоризираат полимерните термореактивни смоли, но генерално има многу типови и јачини на епоксидни смоли (често вмрежени на висока температура), полиестерски смоли (ниска цена, вмрежени на собна температура) и винил естерски смолни системи (ниска цена, низок вискозитет, добра отпорност на вода и лесно процесирање). Постојат и специјализирани смоли, како што се бисмалеимидните, кои се одликуваат со термичка постојаност.

Полимерните матрици кои се користат за композитни материјали треба да ги поседуваат следните својства:

- добри механички својства;
- добри атхезиони својства;
- добри својства на жилавост;
- добра постојаност на атмосферски влијанија.

На Слика 2. 15 (Miracle et al., 2001 и Aluga, 2010) е дадена кривата напрегање/ деформација (stress/ strain) за “идеална” полимерна матрица. Кривата ја покажува крајна јачина на истегнување, високата крутост и високата деформација до кинење. Полимерната матрица во почетокот е крута, но не е

подложна на крто кршење. Кога композитниот материјал е подложен на истегнување (притисок), деформацијата на двата система (полимерната матрица и зајакнувачот) треба да се движи во ист опсег, за да може да се искористат сите механички својства на зајакнувачката компонента.

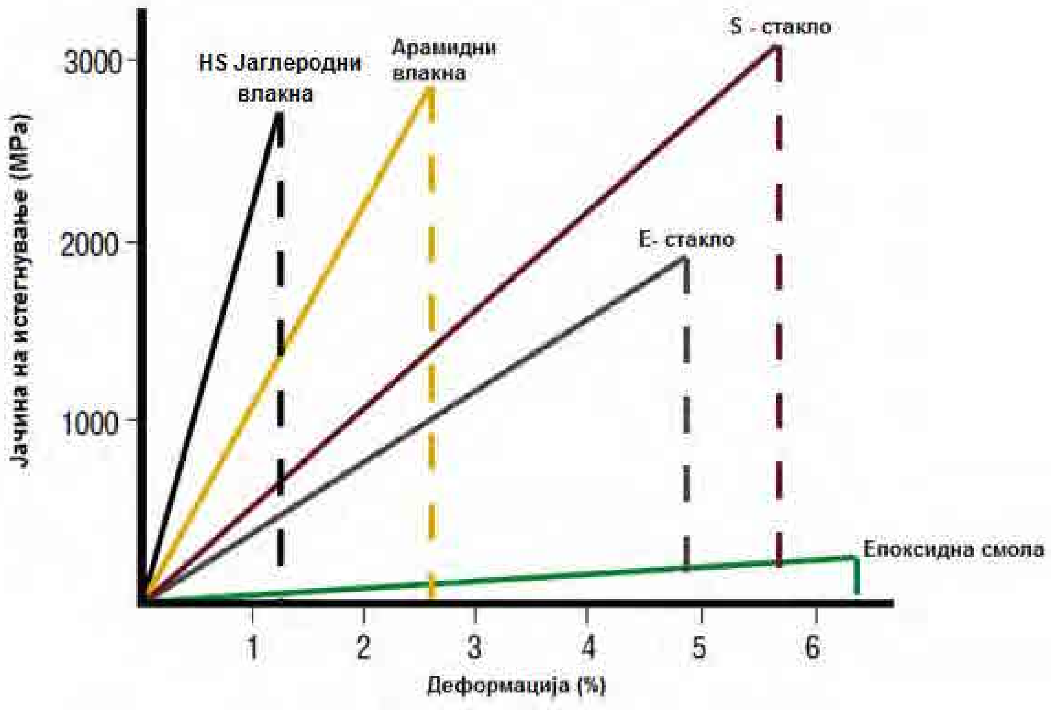


Слика 2. 15 Крива напрегање/ деформација за “идеална” полимерна матрица
Figure 2. 15 Stress /strain curve for an "ideal" polymer matrix

На Слика 2. 16 е претставена деформацијата до кинење на различни видови на зајакнувачки влакна. Може да се види дека, на пример, за да се остварат максимални својства на истегнување на композит зајакнат со Е - стаклени влакна кои имаат деформација до кинење од 4,9 %, треба и полимерната матрица да има минимална вредност за деформација до кинење како и Е - стаклените влакна. Кршењето кај композитниот материјал е резултат на комбинираното однесување на зајакнувачот, полимерната матрица и интерфејсот меѓу зајакнувачот и матрицата, (Srebrenkoska, 2002).

Кога се оценува погодноста на даден полимер за изработка на композитна структура за специфична апликација, битни параметри кои треба да се земат во предвид при употреба на истиот се: температурата, времето, напрегањето, влагата, хемиските ефекти и сл.. Покрај тоа, предисторијата и условите на

процесирање на полимерот можат да влијаат врз својствата на композитот. На пример, порите, меѓуфазното поврзување, заостанатите напрегања и морфологијата можат во широки граници да ги менуваат својствата на еден ист композитен материјал (Lee, 1990 и Mihaljević, 2011).

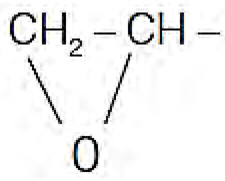


Слика 2. 16 Деформацијата до кинење за Е - стаклени, С - стаклени, арамидни и јаглеродни влакна со висока јачина

Figure 2. 16 Strain to failure for E - glass, S - glass, aramid and carbon fibres

2.6.1 Епоксидни смоли (Epoxy resin)

Епоксидните смоли се класа на разновидни полимерни термореактивни материјали кои се карактеризираат со присуството на два или повеќе циклични прстени во нивната молекуларна структура. Терминот "епоксидна" се однесува на хемиската група која се состои од атом на кислород поврзан за два јаглеродни атоми кои веќе се поврзани на некој начин. Наједноставната епоксидна смола претставува тричлена прстенеста структура позната под терминот "алфа-епокси" или "1, 2 - епокси". Идеализираната хемиска структура е прикажана на Слика 2. 17 и е најлесно идентификувана карактеристика на секоја посложена епоксидна молекула (SP Systems Guide to Composites, 2018 и Bilyeu et al., 2000).



Слика 2. 17 Идеализирана хемиска структура на едноставна епоксидна смола (етилен оксид)
Figure 2. 17 Idealised chemical structure of a simple epoxy (ethylene oxide)

Големата примена на епоксидните смоли се должи на можноста епоксидните групи да стапуваат во различни хемиски реакции и пред се поради нивните корисни својства, како што се високата јачина, ниската вискозност, одличната корозивна отпорност, постојаноста на високи температури и соодветните електрични својства. Тие можат да се користат на температура од 180 - 270 °C. Нивната јачина на истегнување може да биде до 83 MPa, цврстина по Rockwell M110 и издолжување од 2 - 5%. Покрај високата атхезиона јачина и високите механички својства, овие смоли исто така се одликуваат со добри електрични својства, мал коефициент на линеарно ширење, мала апсорпција на влага и добра хемиска отпорност кон растворувачи, масла и хемикалии (Barbero, 2011). Вообичаено епоксидните смоли можат да се препознаат по карактеристичната килибарна или кафеава боја.

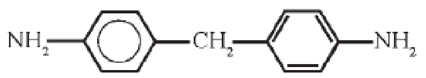
Епоксидните смоли се издвојуваат помеѓу останатите термореактивни смоли поради неколку фактори и тоа (Ratna, 2005 и Penn et al., 1998):

- инхерентно поларна природа која дава одлични атхезиони својства со широк спектар на влакна;
- релативно мало собирање за време на процесот на вмрежување што придонесува за намалување на внатрешните напрегања, што пак значително го олеснува добивањето на потребните димензии на произведените структури;
- потребен е минимален притисок за изработка на производите за кој вообичаено се користат термореактивни смоли;
- нема испарливи нуспроизводи при реакцијата на вмрежување кои би предизвикале појава на несакани празнини;

- употреба на широк спектар на температури со внимателна селекција на вмрежувачките агенси и добра контрола над степенот на вкрстено поврзување;
- достапност на смолите од течна состојба со ниска вискозност до цврста состојба;
- вкрстено поврзана структура која дава одлични отпорност на надворешни влијанија;
- голема разновидност на епоксидните смоли кои може да се формулираат на различни начини за да исполнат широк спектар на специфични барања и перформанси.

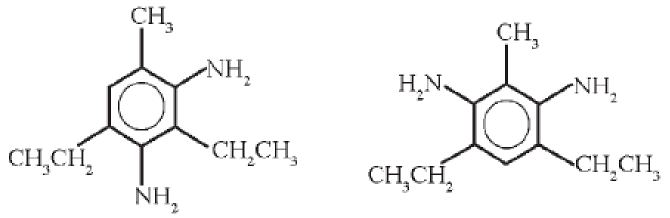
Епоксидните молекули во чиста состојба при собна температура не реагираат меѓусебно и можат да се чуваат со години во сув контејнер. Како и останатите термореактивни смоли и тие исто така се вмрежуваат со примена на различни вмрежувачки агенси и катализатори. Агенсите за вмрежување (вцврснувачи) се додаваат во значителни количини, реагираат со епоксидот и стануваат дел од вкрстената мрежа. Како агенси за вмрежување најчесто се користат алифатичните амини, ароматични амини или анхидриди. Амините се најчесто користени вмрежувачки агенси поради подобрата контрола на епокси - амино реакциите Епоксидни матрици со високи вредности за Tg може да се добијат со употреба на ароматски вмрежувачки агенси како DDM, DDS, DETDA (Williams et al., 2000 и Wiley, 2011). Хемиските структури на некои од најчесто применуваните вмрежувачки агенси се претставени на Слика 2. 18.

Хемиската природа и количината на употребените вмрежувачки агенси играат важна улога во определувањето на термомеханичките својства на вмрежените полимери. Течната смола и агенсот за вмрежување формираат лесно процесирачки систем со ниска вискозност. Епоксидните смоли лесно и брзо се вмрежуваат на која било температура од 5 °C до 150 °C, во зависност од применетиот агенс за вмрежување. Широк спектар на својства како и материјали за екстремни апликации можат да се добијат со употреба на истите смоли, преку внимателна селекција на вмрежувачките агенси. Катализаторите, од друга страна, се додаваат во екстремно мали количини за да предизвикаат епоксидните молекули да реагираат директно едни со други, т.е. да се хомополимеризираат.



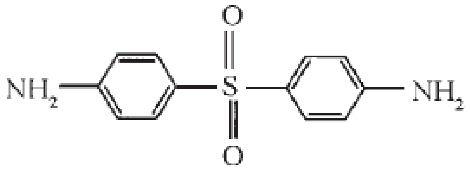
4,4' Диамино дифенил метан (DDM)

4,4' Diamino diphenyl methane (DDM)



Диетил толуен диамин (DETDA)

Diethyl toluene diamine (DETDA)



4,4' Диетил толуен диамин (DDS)

4,4' Diethyl toluene diamine (DDS)

$$NH_2—C_2H_4—NH—C_2H_4—NH—C_2H_4—NH_2$$

Триетилен тетрамин (TETA)

Triethylene tetramine (TETA)

Слика 2. 18 Хемиски структури на некои од најчесто применуваните вмрежувачки агенси

Figure 2. 18 Chemical structures of commonly used curing agents

Понекогаш хемикалиите кои се користат како катализатори за хомополимеризацијата може да се користат и за друга цел т.е. за забрзување на реакцијата на вмрежување. Во овој случај тие повеќе се нарекуваат акцелератори отколку катализатори (Penn и Wang, 1998). Со примена на правилни додатоци, епоксидните смоли можат да покажат извонредна отпорност на топлина (некои дури до 290 °C) и електрични изолациони својства. Тие можат да бидат во течна или цврста состојба и може да се вмрежуваат или на собна температура или со загревање. Кога е потребно постигнување на максимални перформанси, се користи вмрежувањето при загревање. Генерално епоксидните смоли се вмрежуваат побавно од другите термореактивни смоли. Типичните механички својства на некои епоксидни смоли се дадени во Табела 2.12.

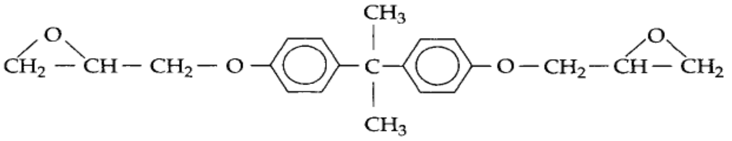
Табела 2. 12 Механички својства на некои епоксидни смоли
Table 2. 12 Mechanical properties of some epoxy resins

Тип на епоксидна смола/ Type of epoxy resin	Јачина на истегнување/ Tensile strength [MPa]	Модул на еластичност при истегнување/ Tensile modulus [GPa]	Издолжување при истегнување/ Tensile elongation [%]	Температура на стаклосување/ Glass temperature Tg [°C]	Густина/ Density [g/cm^3]
9310/9360@23°C	75,8	3,12	4	185	1,2
9310/9360@149°C	26,2	1,4	5,2	185	1,2
9420/9470(A)@23°C	57,2	2,66	3,1	195	1,162
9420/9470(B)@23°C	77,2	2,83	5,2	155	1,162
HPT072/1062-M@23°C	-	3,383	-	239	-

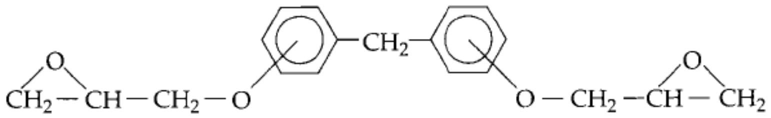
Од табелата може да се види дека повисоката температура на стаклосување резултира во покршлива матрица со помало издолжување и пониски механички својства. Друг проблем е апсорпцијата на влага поради нејзиното влијание врз механичките својства на матрицата и композитниот материјал. Епоксидните матрици може да се користат на температури помеѓу 125 - 175 °C. За да се зголеми жилавоста на смолата и композитниот материјал, основните епоксидни смоли се зајакнуваат со додатоци, вклучувајќи примена и на термопласти. Температурата на примена на зајакнатите смоли е пониска во споредба со незајкнатите смоли до 125 °C. Температурата на процесирање е секогаш под температурата на стаклосување и е највисока за незајакнатите смоли (до 247 °C) и најниска за зајакнатите смоли (помеѓу 76 и 185 °C), (Schwartz,1992).

Епоксидните смоли имаат широка примена за добивање на структурни лепила, површински облоги, инженерски композитни материјали и електроизолациони ламинати. Генерално, епоксидните смоли ги надминуваат повеќето други типови смоли во поглед на механичките својства и отпорноста на деградација на животната средина, што придонесува за нивна широка примена во авионската, поморската, воената, градежната и хемиската индустрија. Цената на епоксидните смоли е пропорционална на нивните перформанси и може да варира во широк ранг. Иако се достапни многу различни видови на епоксидни смоли, само неколку се фаворизирани за изработка на композитни материјали зајакнати со влакна. Најчесто употребува епоксидна смола е таа која се карактеризира со присуство на две епоксидни групи (DGEBA).

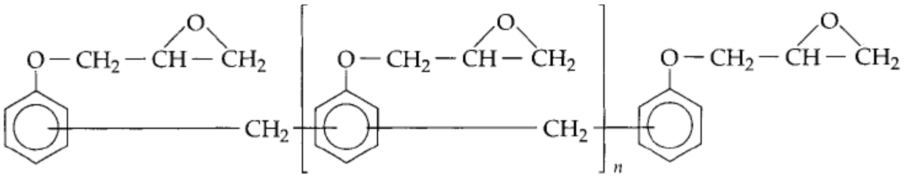
Мултифункционални епоксидни смоли со три или четири функционални групи се исто така достапни (сл. 2.19).



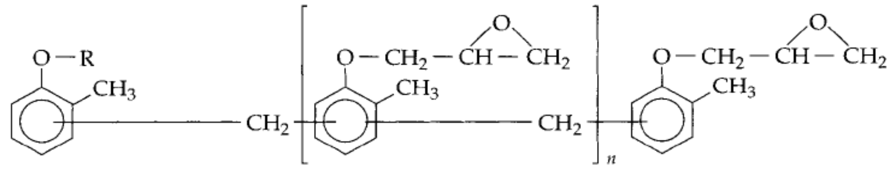
Диглицидил етер на бисфенол А (DGEBA)
Diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA)



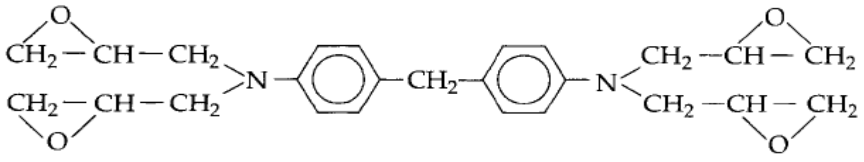
Диглицидил етер на бисфенол F (DGEBA)
Diglycidyl ether of bisphenol F (DGEBF)



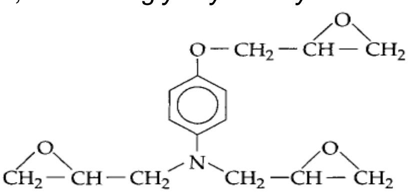
Полиглицидил етер на фенол-формалдехид Новолак
Polyglycidil ether of phenol-formaldehyde Novolac



Полиглицидил етер на о-крезол-формалдехид Новолак
Polyglycidil ether of o-cresol-formaldehyde Novolac



N, N, N', N' - Тетраглицидил метилендианилин
N, N, N', N' - Tetraglycidyl methylenedianiline



Triglycidyl p-aminophenol
Триглицидил п-аминофенол

Слика 2. 19 Хемиски структури на функционални и мултифункционални епоксидни смоли
Figure 2. 19 Chemical structures of functional and multifunctional epoxy resins

2.7 Процеси на производство (Production processes)

Изборот на производниот процес зависи од типот на применетите материјали (матрица, текстилен зајакнувач), температурата потребна за формирање на делот и за вмрежување на матрицата, како и ефективноста на процесот од аспект на трошоците. Често пати при дизајнот на композитната структура прво во предвид се зема процесот на производство. Ова е поради тоа што избраниот процес на производство мора да е соодветен за добивање на композитна структура со даден дизајн, а исто така и од аспект на трошоците, волуменот на производство и стапката на производство. Поради тоа дизајнерот мора да ги познава предностите, ограничувањата, трошоците, стапката и волуменот на производство како и типичната примена на различните производни процеси. Во дизајнот на композитната структура материјалот се дизајнира паралелно со структурата. Оваа слобода му овозможува на технологот да дизајнира структури со високи перформанси, ако знае на кој начин материјалот ќе се процесира (Barbero, 2011 и Long, 2005).

Процесирањето на полимерните композитни материјали ги вклучува следниве операции:

1. Позиционирање на влакната во бараната ориентација;
2. Импрегнација на влакната со смола;
3. Консолидација на импрегнираните влакна со цел да се отстрани вишокот на смола, воздух и испарувања;
4. Вмрежување или солидификација на полимерот;
5. Вадење од калапот и
6. Доработка (завршни операции), како на пример отстранување на вишокот на материјал.

Основните процеси кои се користат за производство на композити зајакнати со текстилен материјал се:

- Рачно положување (Hand lay - up);
- Полагање на препрег (Prepreg lay - up);
- Компресионо пресување (Compression molding);
- Пресување со пренос на смолата (Resin transfer molding) - RTM;
- Процесирање со автоклав (Autoclave processing);

- Инјекционо пресување (Injection molding);
- Пултрузија (Pultrusion);
- Намотување на филаменти (Filament winding).

Различните производни процеси се разликуваат според начинот на кој операциите се изведуваат. Некои од овие операции може да се комбинираат на едноставен начин со цел да се заштеди на време. На пример, позиционирањето на влакната, импрегнацијата и консолидацијата симултано се изведуваат кај процесот на намотување на филаменти. Некои операции може претходно да бидат изведени како импрегнацијата на препрегот кој последователно се користи при рачното положување. Различните начини на процесирање на материјалите има значително влијание врз трошоците, стапката на производство, квалитетот и перформансите на крајниот производ. Секој метод на производство се карактеризира со одредени предности и ограничувања кои влијаат врз структуралниот и материјалниот дизајн на композитната структура.

2.7.1 Рачно положување (Hand lay - up)

Техниката на рачно положување исто така позната како влажно положување е наједноставниот и најчесто користениот производен процес. Во основа овој процес се состои од рачно положување на сув зајакнувач во калапот и последователна апликација на смола (сл. 2. 20). Потоа влажниот композит се поминува со рачни валјаци со цел да се олесни униформната дистрибуција на смолата и отстранување на воздушните џебови. Овој процес се повторува се додека не се постигне посакуваната дебелина. Положената структура потоа се отстранува. Емисијата на испарувања, како што е стиренот, е висока исто како кој било друг метод на отворен калап. Воглавно процесот на рачно положување може да се подели во четири основни чекори: подготовка на калапот, обложување со гел, положување и вмрежување.

Подготовката на калапот е еден од најкритичните чекори при процесот на рачно положување. Калапот може да биде изработен од дрво, гипс, пластика, композит или метал во зависност од бројот на делови, температурата на вмрежување, притисокот итн.. Долготрајни калапи изработени од метал се користат за голем обем на производство. Калапи изработени од композит пак воглавно се користат за мал обем на производство, бидејќи не реагираат добро

на повторна употреба. Калапот може да биде од машки или женски тип, во зависност од тоа која површина треба да е мазна. Облога од средство за одвојување се аплицира на калапот за да го олесни отстранувањето на крајниот дел. Најчесто како средства за одвојување се користат восок, поливинил алкохол, силикон и хартија за одвојување. Изборот на средството за одвојување зависи од типот на материјал кој се пресува и посакуваниот степен на сјај кај крајниот производ.

Слика 2. 20 Рачно положување
Figure 2. 20 Hand lay - up

Облога од гел се поставува по подготовката на калапот за да се добие добар површински изглед на делот кој се пресува. Како облога вообичаено се користи слој од полиестер, незајакнат, полн со минерали и пигменти. Слој на смола се положува во калапот пред поставување на зајакнувачот. Како резултат на ова, површината од гелот, всушност, станува надворешната површина на ламинатот кога пресувањето ќе заврши. Ова површина формира заштитен слој низ кој влакнестите зајакнувачи не пенетрираат и на овој начин продуктот нема потреба од дополнителни операции на доработка. Последниот чекор вклучува подготовка на материјалот, позиционирање на влакната и вмрежување. Влакната можат да бидат во форма на сечкан мат, ткаенина или ткаен ровинг. Претходно измерените количини на смола и катализатор внимателно се мешаат заедно. Потоа мешавината од смола се аплицира врз влакната. Се користат назабени рачни валјаци за набивање на материјалот во калапот и за да се осигури целосно отстранување на воздухот. Вмрежувањето вообичаено се изведува на собна температура и готовиот пресуван дел се отстранува со

извлекување од калапот. Некои од предностите и недостатоците на процесот на рачно положување се дадени во Табела 2. 13, додека типичните примени на овој процес се претставени во Табела 2. 14.

Табела 2. 13 Предности и недостатоци на процесот на рачно положување
Table 2. 13 Advanatages and disadvantages of hand lay-up process

Предности/ Advantages	Недостатоци/ Disadvantages
Може да се произведат големи делови со комплексна геометрија/ Large parts with complex geometries can be produced	Само една површина од пресуваниот дел е мазна/ Only one surface of the molded part is smooth
Минимална инвестиција во опрема/ Minimal equipment investment	Квалитетот зависи од вештините на работниците/ Quality depends on the skill of workers
Минимални трошоци за алат/ Minimal tooling cist	Вложување на голем труд/ Labor intensive
Содржина на пори под 1 %/ Void content under 1 %	Ниска стапка на производство/ Low production rate
Возможна е конструкција на сендвич структури/ Sandwich construction is possible	Висока емисија на испарливи компоненти/ High emission of volatiles
Додатоците и структурните зајакнувачи лесно може да се прилагодат/ Inserts and structural reinforcements can be easily accommodated	Униформноста на производите тешко се одржува/ Product uniformity is difficult to maintain
Лесно се произведуваат делови кои имаат потреба од одличен краен резултат / Parts requiring excellent finish are easily manufactured	Долго време на вмрежување на собна температура/ Long curing times at room temperature
Не се потребни печки за вмрежување/ Curing ovens are not necessary	

Стапката на производство и трошоците за техниката на рачно положување варираат во широк дијапазон и зависат од влакната и матрицата кои се користат, големината на делот кој треба да се произведе и процесот кој се користи. Трошоците за калапот зависат од бројот на делови кои треба да се произведат бидејќи за висок обем на производство се потребни калапи со висок квалитет. Нов калап се изработува за секој нов дел. Трошоците за опремата зависат од стапката на производство, бидејќи за остварување на висока стапка на производство ќе е потребно да се инсталираат неколку линии со висока брзина на работење. Трошоците за произведен дел може да се минимизираат со избирање на соодветна конструкција на калап и прилагодување на стапката на

производство според достапната опрема. Крајно, трошоците за произведен дел исто така зависат и од квалитетот кој се бара, во зависност од тоа дали треба да се ангажираат делумно квалификувани или квалификувани работници (Barbero, 2011).

Табела 2. 14 Некои апликации на процесот на рачно положување
Table 2. 14 Some applications of hand lay up

Апликација/ Aplication	Производи/ Products
Поморската индустрија/ Marine	Чамци, трупови за бродови, канали, базени, резервоари, мебел/ Boats, boat hulls, ducts, pools, tanks, furniture
Авионската индустрија/ Aircraft	Млазници за погонски мотор и други авионски делови/ Rocket motor nozzles and other aircraft parts
Структурни делови/ Structural	Филтри за печка, структурни потпори, рамни и брановидни плочи, некорозивни канали, цевки за домаќинството и сл./ Furnace filters, structural supports, flat and corrugated sheets, corrosion duct work, housings pipes,
Потрошувачи/ Consumer	Делови за велосипеди, делови за камиони/ Bicycle parts, truck parts

Делумна автоматизација на процесот на рачно положување е постигната со примена на процесот на распрскување, кој се разликува од рачното положување според начинот на поставување на смолата и зајакнувачот. Континуираните влакна се сечкаат и распрснуваат во калапот истовремено со смолата со примена на специјален пиштол за распрснување. Процесот на распрскување е стар процес кој начесто се користи за производство на делови со константна дебелина: делови од камиони, мали бродови и делови за автомобили. Со оглед на фактот што операторот целосно го контролира нанесувањето на смола и влакна во калапот, квалитетот на производот комплетно зависи од вештините на операторот. Ова придонесува за добивање на производи со различни физички својства, квалитет и изразена неуниформност. Трошоците за специјален пиштол за распрскување и други специјални алати придонесуваат за зголемување на вкупните производни трошоци. Направен е обид за комплетна автоматизација на процесот на рачно положување, но констатирано е дека истиот е неефикасен и многу скап поради високите трошоци за потребната опрема и алати.

2.7.2 Положување на препрег (Prepreg lay - up)

Препрег е преимпрегниран материјал зајакнат со влакна каде смолата е делумно вмрежена или вцрстена. Влакната може да бидат во форма на унидирекционална лента, ткаенина или листови од случајно ориентирани влакна (сечкани) (сл. 2 21). Основната разлика помеѓу положувањето на препрег и конвенционалното рачно положување е во тоа што при примената на препрег импрегнацијата на влакната е извршена пред да се полагаат (Hexcel Corporation, 2013).

Слика 2. 21 Различни видови на препрег материјали (Hexcel Corporation, 2013)
Figure 2. 21 Different types of prepreg materials. (Hexcel Corporation, 2013)

Повеќето препрези се изработени од епоксиден смолен систем и како зајакнувачи вообичаено примена наоѓаат стаклените, јаглеродните и арамидните влакна. Кај повеќето препрези содржината на смола е повисока отколку што е пожелно во финалниот дел. Отстранувањето на вишокот на смола е проследено со отстранување на заробени воздушни меури и други испарливи компоненти, што може да резултира со појава на пори во финалниот дел доколку не се отстранат. Ова е неопходно бидејќи за секој 1 % на пори настанува намалување на внатрешната сила на смолкнување за 7 % и значително намалување на јачината на компресија се случува при содржина на пори над 2 %. Од друга страна, помалата содржина на смола придонесува за намалување на тежината и цената без да влијае на јачината. Произведени се нови препрези со приближно потребната нето количина на смола со цел да се избегне отстранувањето на вишокот на смола, но ова е проследено со зголемување на трошоците. Приближно потребната нето количина на смола значи дека количината на смола во препрегот се одржува близу до посакуваната содржина

на смола во финалниот дел. Овие препрези се добиени со користење на методот на топла импрегнација со топење кое ја минимизира содржината на испарливи компоненти присутни во препрегот. Препрезите вообичаено се набавуваат во ролни со конвенционална ширина (30 - 60 cm). Тие вообичаено се сечат за да се прилагодат на калапот и се полагаат слој по слој се додека не се постигне посакуваната дебелина. Бидејќи смолата е делумно вмрежена, препрезите имаат ограничен рок на траење кој може да се зголеми со нивно чување во ладилници. Вообичаено, автоклав или вакуум е потребно за консолидирање и вмрежување на деловите ламинирани со препрег. Некои од предностите и недостатоците на примената на препрезите се дадени во Табела 2.15 (Barbero, 2011).

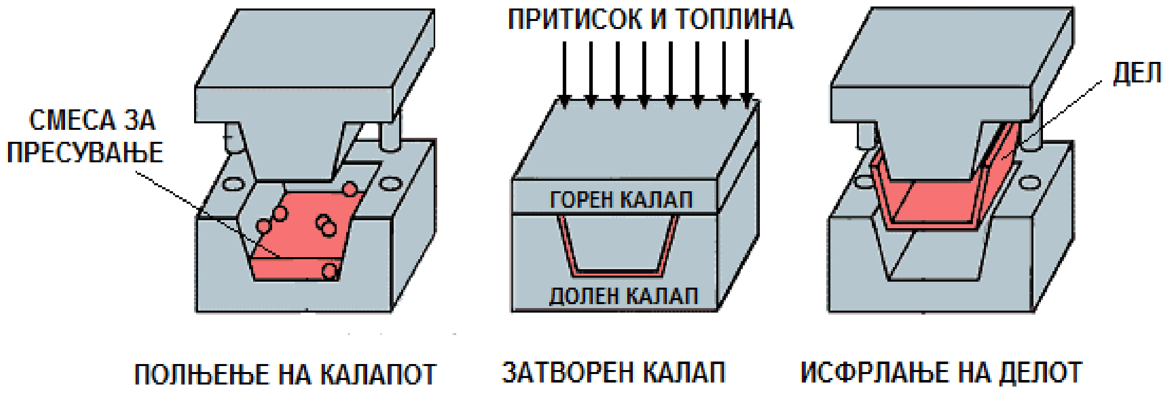
Табела 2. 15 Предности и недостатоци на примената на препрези
Table 2. 15 Advanatages and disadvantages of hand lay-up process

Предности/ Advanatages	**Недостатоци/ Disadvantages**
Висок волуменски удел на влакната/ High fiber volume fractions	Потребно е подолго време и вложување на поголем труд/ Slow and labor intensive
Униформна дистрибуција на влакната/ Uniform fiber distrubution	Поскапа опрема за вмрежување/ More expensive curing equipments
Едноставно производство/ Simplified manufacturing	Дополнителни трошоци за изработка на препрег/ Added cost of making prepreg

Достапни се и препрези со термопластична матрица од поголем број на влакна во различни форми. При нивната примена, потребно е да се загреат за да може да се обликуваат бидејќи тие вообичаено се крути на собна температура. Процесирањето на термопластичните смоли се разликува од процесирањето на термореактивните смоли. При процесирањето на термоластичните смоли вообичаено се потребни поголеми температури и притисоци поради вискозноста на смолата која треба да се намали со загревање за време не процесот. Потоа вмрежувањето е заменето со едноставно ладење на собна температура. Препрезите наоѓаат широка примена за изработка на високо перформанси авионски делови со комплексна геометрија, изградба на ветерници, автомобили, спортска опрема, цевки за експлоатација на гас и нафта и производство на садови под притисок (Mazumdar, 2002).

2.7.3 Компресионо пресување (Compression Molding)

Процесот на компресионо пресување претставува една од поважните технологии за добивање полимерни композитни материјали. При овој процес се користат соодветни машки и женски метални делови кои го формираат калапот. Измерени количини на смола и влакна се додаваат во калапот (сл. 2. 22), (Encyclopædia Britannica, 2018). Дополнително се користи хидраулична преса со загревање и релативно висок притисок за вмрежување на влакната и смолата преку затварање на двата дела (машкиот и женскиот) од калапот. По вмрежувањето на материјалот, притисокот се отстранува и делот се извлекува од калапот. По пресувањето дополнително може да се изврши отстранување на сјајот и поствмрежување.



Слика 2. 22 Компресионо пресување (Encyclopædia Britannica, 2018)
Figure 2. 22 Compression molding (Encyclopædia Britannica, 2018)

Процесот на компресионо пресување е релативно едноставен и добро поставен процес. Ги минимизира трошоците за подготовка на деловите, речиси го елиминира отпадот од материјал, ја редуцира секундарната доработка и бара вложување на минимален труд. Процесот лесно може да се автоматизира, овозможувајќи висока продуктивност со многу добра униформност и квалитет на произведените делови.

Пресата е најзначаен и најскап дел од опремата потребна за процесот на компресионо пресување. Пресите кои се користат при овој процес вообичаено се вертикални со подвижен машки и женски дел на калапот изработени од челик. Површината на калапот е полирана и понекогаш обложена со хром со цел да се

зголеми цврстината на површината. Големината на пресите се движи од 100 до 400 тони и може да се користат за производство на делови со маса помала од 1 кг или над 75 kg. Дополнителната опрема вклучува предзагревачи и предоформувачи кој овозможуваат побрз циклус на пресување и го намалуваат задржувањето на воздух на крајниот производ. Процесот на компресионо пресување не дозволува висока содржина на континуирани влакна. Поради тоа деловите не се соодветни за примарни структури, иако тие наоѓаат примена за некои секундарни структури. Компонентите добиени со овој процес исто така се користат кога се бара висока крутост, со дизајнирање на ребра и фланши во делот.

Најчесто користени компоненти при процесот на компресионо пресување се BMC (прес маса) и SMC (ленти за пресување). Исто така, може да се користат сечкани влакна, влакнести претформи и препрег. Прес масата е вискозна маса со содржина на влакна од 20 до 50 %. Комбинација од полнители (минерали, целулоза, итн.) се мешаат со смола во мешалка. Како зајакнувачи може да се користат стаклени, целулозни, памучни или други влакнести материјали. Добиената смеса се става во калап на температура од 150 до 200 °C и пресува со притисок од околу 3 до 4 MPa.

Лентите за пресување имаат поголема содржина на влакна и се состојат од подолги влакна во споредба со прес масата. Може да бидат пресувани во дебели и тенки делови максимално задржувајќи го интегритетот на влакната. Лентите за пресување содржат смола, полнители, катализатори и преимпрегнирани зајакнувачи и се сечат во листови со соодветна големина кои се ставаат во загреаниот калап. Генерално температурата на пресување е од 150 до 200 °C и се пресува при притисок од 7 до 14 MPa (Barbero, 2011).

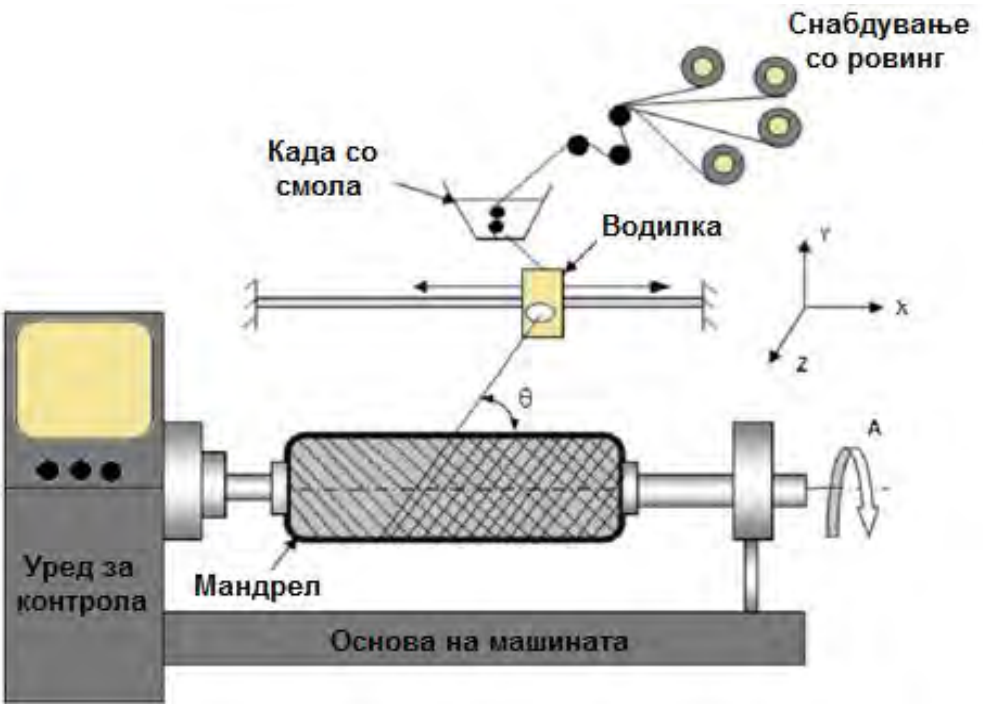
2.7.4 Процес на намотување на филаменти (Filament winding process)

Една од применуваните технологии за производство на полимерни композитни материјали зајакнати со текстил е „процесот на намотување на филаменти“. Вообичаено овој процес се користи за производството на цилиндрични и сферични форми т.е. се користи за производство на резервоари и цистерни за хемикалии и горива, како и за производство на цевки со различен дијаметар (од неколку сантиметри до еден или два метри) (Pinar, 2005). Процесот на намотување на филаменти дава можност дизајнерот да ги креира механичките карактеристики и да ги оптимизира јачината, цврстината и термичката стабилност на добиените композитни структури. Најчесто користени зајакнувачки текстилни структури при процесот на намотување на филаменти се континуираните стаклени, јаглеродни или арамидни влакна, додека од полимерните матрица примена наоѓаат термореактивни смолни системи (Hull и Clyne, 1996).

Во процесот на намотување на филаменти, текстилниот зајакнувач, на пример во форма на ровинг или монофиламент, се намотува на ротирачки мандрел се додека не се покрие површината на мандрелот и не се постигне бараната дебелина. Процесот е потполно автоматизиран и истиот бара минимално вложување на труд, што придонесува за значително намалување на производните трошоци.

За изведување на оваа технологија се користат специјално дизајнирани машини, чија брзина е синхронизирана со брзината на ротација на мандрелот, а исто така нудат и можност за варијација на брзината на намотување и затегнатоста на зајакнувачот како и аглите под кои се намотува зајакнувачот. Во зависност од потребата и капацитетот на поодделните производители достапни се машини во различни големини и конфигурации. Денеска повеќето машини за намотување на филаменти се компјутерски контролирани и автоматизирани така што се постигнува повисок степен на слобода на положување на филаментите во посакуваната позиција. Ваквиот дизајн на машината дава можност да се постигнуваат и комплексни конфигурации (цилиндрична, сферична, конусна и др. форми) во дизајнот на продуктите. Постојат два типа на машини за намотување: спирална и поларна. Поларните машини за намотување се

користат за производство на сферични или цилиндрични резервоари со сооднос должина - дијаметар помал од 2. Поларната машина за намотување од механички аспект е поедноставна и поради тоа поевтина и побрза во однос на спиралната машина за намотување.



Слика 2. 23 Шематски приказ на процесот на намотување на филаменти (Assaleh, 2011)
Figure 2. 23 Schematic representation of the filaments winding technique (Assaleh, 2011)

На Слика 2. 23 (Assaleh, 2011) е даден шематски приказ на процесот на намотување на филаменти. Основниот принцип се состои од повлекување на филаментните нишки од шпулите поставени на гатерот. Филаментните нишки се водат низ системот за раздвојување (кој се состои од чешли) со цел да се овозможи нивно поединечно движење. Раздвоените филаментни нишки поминуваат низ када со смола (во случај на влажно намотување), во која се наоѓа систем од валјаци кои ја регулираат количината на нанесена смола. На излез од кадата со смола, филаментните нишки се собираат во водилка (прстен) со помош на која се формира ширината на слојот кој се намотува на површината на мандрелот.

Филаментите се движат и напред и назад по должината на ротирачкиот мандрел, кој е придвижуван од мотор. Филаментните нишки се водат со одредена затегнатост која е значајна за одржување на нивниот правец на положување врз површината на мандрелот. Самиот процес продолжува со намотување на дополнителни слоеви врз површината на мандрелот, се додека не се постигне потребната дебелина на композитниот дел. Ориентацијата на влакната може да се контролира со примена на различни брзини на надолжното движење на влакната и брзината на ротација на мандрелот. Затегнатоста на филаментните нишки е значајна за да се држат во одреден правец кога се намотуваат врз површината на мандрелот. Секој слој може да се разликува во однос на затегнатоста при намотувањето, аголот на намотување или содржината на смола. На крај се врши втврднување (вмрежување) на добиениот композитниот дел во електрична или гасна печка на одредена температура и негово отстранување од мандрелот. Оваа технологија вообичаено се користи за производство на цилиндрични или сферни композитни структури. Површините на овие структури се обично конвексни, бидејќи доколку површината е конкавна, при аплицирање (положување) на влакната на таква површина може да се појави дефект (лом).

Постојат различни видови на мандрели со цел да се олесни отстранувањето на произведениот композитен дел. Наједноставна алтернатива која се користи за некои резервоари под притисок е да се користи метална цевка како мандрел и да се остави цевката како интегрален дел од крајниот производ. Ова понекогаш е потребно за да се спречи протекувањето на гасовите преку дифузија низ ѕидот на композитниот материјал. Составувачкиот мандрел пак е изработен од сегменти кои може да се расклопат по вмрежувањето на делот. Овие се најскапите мандрели и поради тоа се користат само при масовно производство. Може да се користи и растворлив песочен мандрел од песок и поливинил алкохол. Смесата се излива во два или повеќе дела, така што кога ќе се состават, ја даваат посакуваната форма. Кога композитот е испечен мандрелот се распаѓа со вбризгување на жешка вода. Мандрели од гипс се користат само за прототипови или за мали производства на големи делови бидејќи бараат вложување на голем труд и може да настане оштетување на делот за време на неговото отстранување.

Основни предности на процесот на намотување на филаменти се (Filament winding, 2018):

- Производство на композитни структури со висока специфична јачина и висок специфичен модул;
- Висок степен на униформност во дистрибуцијата на влакната, ориентацијата и положувањето;
- Минимално вложување на труд, бидејќи процесот е автоматизиран;
- Процесот е соодветен за изработка на композитни делови со прецизни димензии;
- Возможна е ориентација на влакната во посакуваната насока;
- Значително пониски трошоци за изработка на композитни делови во споредба со другите методи на производство, бидејќи со овој процес е возможно производство на делови со висока јачина при ниски материјални трошоци;
- Флексибилност во дизајнот на композитниот дел е возможна преку промена на аголот на намотување, материјалот и процесот на вмрежување;
- Големината на композитните делови не е ограничена;

Главни недостатоци на овој процес се:

- Капиталните инвестиции за опрема се релативно високи;
- Потребна е многу голема контрола на механизмот за униформна дистрибуција и ориентација на влакната;
- Не е возможно производство на комплексни форми;
- За некои апликации мандреалот може да е премногу скап и површината на композитниот дел да не ги исполни барањата за квалитет;
- При положувањето ориентацијата на влакната не може да се менува во рамките на еден слој.

Најголемо ограничување на процесот на намотување на филаменти е производството на комплексни форми, заради потребата од мандреал со сложен дизајн. Максималната дебелина која може да се намота е ограничена од пролизгувањето на влакната и нивното брчкање под дејство на притисокот на следниот слој кој се намотува. Кога дебелината е голема, може да е потребно

процесот на намотувањето привремено да се прекине и делумно вмрежување на смолата пред да се додадат повеќе слоеви. Ова го забавува процесот на производство што резултира со дополнителни трошоци. Поради тоа се преферира производство на релативно тенки структури. Содржината на пори, исто така, може да биде висока бидејќи не се користи ниту вакуум, ниту автоклав и вмрежувањето на смолата се изведува при ниски температури. Обемот на производство за процесите на намотување на филаменти варира многу бидејќи големината на деловите и типот на потребниот мандрел го детерминира времето потребно за поставување и отстранување на делот од машината за намотување. Ако не се земат во предвид времето на поставување и отстранување, обемот на производство е диктиран од брзината со која влакната се намотуваат на мандрелот. Брзината на намотување на влакната варира во зависност од нивната јачина.

2.7.4.1 Методи за намотување и импрегнација во технологијата за намотување на филаменти (Methods for winding and impregnation in filaments winding technology)

Системот на соединувањето на зајакнувачот со смола се нарекува систем за импрегнација. Во зависност од тоа каде настанува импрегнацијата на зајакнувачките влакна се разликуваат две постапки на импрегнација:

- Суво (импрегнирано) намотување: во кој неимпрегрирани влакната се влечат и директно се позиционираат и импрегнацијата се случува на површината на ротирачкиот мандрел;
- Влажно намотување: во кој влакната поминуваат низ бања со смолен систем и се намотуваат на ротирачки мандрел.

Сувото намотување овозможува производство на композитни структури со подобри механички својства. Сепак, поради високите материјални трошоци за импрегнација, оваа техника обично се користи за високо перформансни апликации.

Во споредба со сувото намотување, влажното намотување има низа други предности: ниска цена на чинење, пократко време на намотување и можност за варијација на формулацијата на смолата, така што би можеле да се постигнат

специфични перформанси. Кај влажниот метод на намотување на влакната, квалитетот зависи од повеќе фактори. Вискозноста на смолата има големо значење кај оваа технологија за производството на композити. Доколку вискозноста е премногу голема, импрегнирањето на влакната е нерамномерно. При ниска вискозност на смолниот систем, смолата може да истече надвор од готовиот дел за време на процесот на намотување што може да резултира со релативно понизок масен процент на смолата во готовиот производ и неправилно импрегнирање.

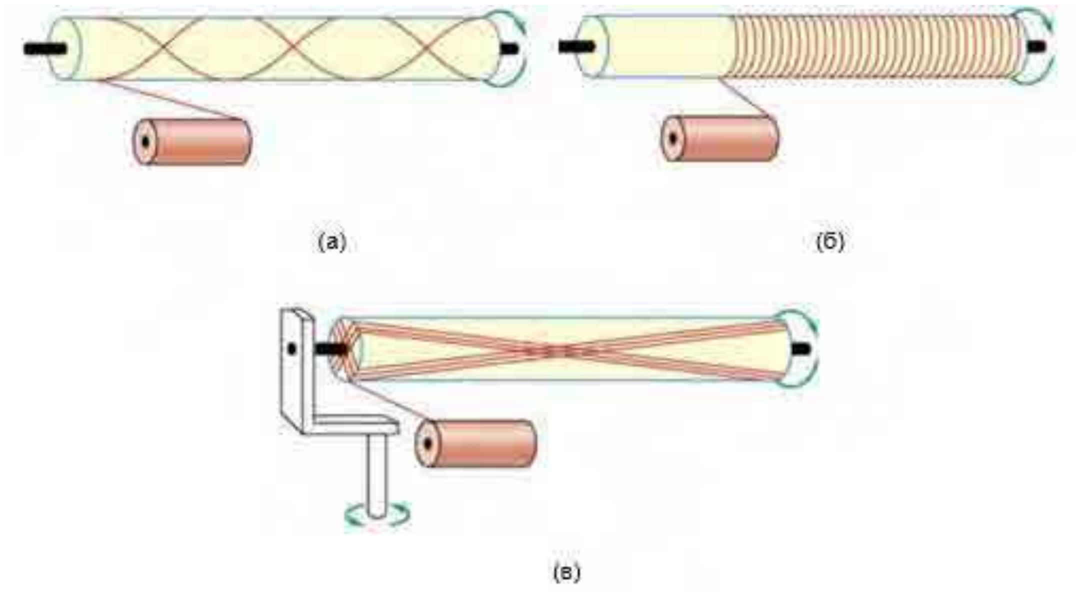
Затегнатоста на филаментите е, исто така, од големо значење бидејќи од неа зависи колку добра импрегнација ќе имаме и може да влијае врз механичките својства на добиениот готов производ. Бидејќи филаментите се спакувани во ролни при техниката на намотување, неопходно е нивната затегнатост постојано да се контролира пред процесот на импрегнација. Ова може да се постигне со примена на соодветен електронски уред за контрола кој овозможува прецизна контрола на затегнувањето на влакната при намотување, што е неопходно за добивање на производи со висок квалитет. Влијанието на затегнатоста на влакната го проучувал Turto со соработниците, (Turto et al., 2009). Со зголемување на затегнатоста на влакната д 10 до 26 N, силата на кинење се зголемува од 1500 на 1800 MPa, а содржината на влакна по примерок се зголемува од 56 vol % на 63 vol %. Cui и Yin (Cui и Yin, 2017) користеле нов метод за контрола на затегнатоста на влакната и заклучиле дека крајната затегнатост значително влијае врз механичките својства на композитните цевки. Влијанието на различните параметри (вискозноста на смолата, затегнатоста на влакната, вмрежувањето и др.) врз импрегнацијата кај влажното намотување, е предмет на интерес на голем број на автори (Cohen, 1997 и Lee et al., 2005).

Во технологијата на намотување на филаментите постојат три основни начини за намотување на филаментите и тоа:

- ***Спирално намотување*** (сл. 2. 24 а) - при ова намотување, ротирачкиот мандрел се движи со константна брзина додека филаментните се движат трансверзално напред назад со одредена брзина со цел да се генерира посакуваниот спирален агол (± θ). Кај ова намотување, по неколку движења од едниот кон другиот крај се забележува преплетување на слоевите и

количината на намотани филаменти во еден правец, мора да биде иста и во другиот правец.

- ***Радијално намотување*** (сл. 2. 24 б) - при ова намотување ротирачкиот мандрел е неподвижен додека аголот на намотување е речиси 90° и може да се користи во комбинација со спирално намотување.
- ***Поларно намотување*** (сл. 2. 24 в) - при ова намотување филаментите поминуваат тангенцијално од поларниот отвор на едниот крај од комората и потоа се движат тангенцијално во спротивна насока на поларниот отвор на другиот крај од комората. Со други зборови влакната се намотуваат од едниот до другиот пол, како што мандрелот ротира лонгитудинално. Се користи за аксијално намотување на туби и разни видови на садови што се користат под притисок.



Слика 2. 24 а) Спирално намотување; б) Радијално намотување; в) Поларно намотување

Figure 2. 24 a) Helical winding; b) Hoop winding; v) Polar winding

Од наведените начини на намотување, спиралното намотување е најфлексибилно бидејќи е возможно варирање на аголот на намотување на филаментите во однос на оската на мандрелот.

2.8 Литературен преглед (Literature review)

Дизајнот и анализата на текстилните композити е широка област за истражување и голем број на автори дале свој придонес во толкувањето и разрешувањето на одредени аспекти преку проучување на факторите кои влијаат врз крајните механички својства. Добивањето на композитни цевки со примена на технологијата на намотување на филаменти претставува истражувачки предизвик кој подразбира решавање на повеќе проблеми: соодветен избор на зајакнувачки влакна и полимерна матрица и постигнување на нивна компатибилност со примена на разни додатоци, определување на оптимални параметри на процесот на намотување на филаменти (брзина на намотување, затегнатост на влакната, агол на намотување на влакната и сл.). Од совладувањето на овие предуслови ќе зависат и својствата на добиената композитна структура. Преку анализа на физичко - механичките својства на композитните цевки може да се даде оцена за употребната вредност на композитните цевки. Влијанието на аголот на намотување врз механичките својства на композитните цевки произведени со технологија на намотување на филаменти е предмет на истражување на повеќе автори и некои од најзначајните истражувања кои одат во прилог на предметот на интерес на оваа докторска дисертација се дадени во континуитет. Во поголем дел од спроведените истражувања механичките константи и карактеристики се детерминирани со примена на соодветни механички тестови и анализи.

De Carvalho со соработниците (De Carvalho et al., 1995) го одредиле најсоодветниот агол за дадена геометрија на површината со спречување на пролизгувањето на влакната и нивно премостување преку локална конкавна површина. Jones со соработниците (Jones et al., 1996) го користеле делта - оксиметричкиот модел за пресметување на шемата на намотување. Rousseau со соработниците (Rousseau et al., 1999) извршиле параметриски студии за влијанието на аголот на намотување врз оштетувањето на композитните цевчести структури. Beakou со соработниците (Beakou и Mohamed, 2001) ја користеле класичната теорија за ламинирање за да го анализираат ефектот на променливото расејување на оптималниот агол на намотување на цилиндрични композити. Koussios и Bergsma (Koussios и Bergsma, 2002) развиле равенство за

континуирано радијално и поларно намотување на влакната на цилиндрични садови под притисок со примена на негеодезиски траектории.

P. D. Soden со соработниците (Soden et al., 1993) го истражувале влијанието на аголот на намотување врз јачината и деформацијата кај композитни цевки врз база на Е - стаклени влакна/ епоксидна смола изложени на едноаксијално и биаксијално оптоварување преку користење на различни комбинации на внатрешен притисок и аксијално напрегање. Испитувањата покажале дека тест примероците без внатрешни облоги можат да издржат помали оптоварувања поради истекувањето на матрицата низ пукнатините. Истекувањето и оштетувањето зависело од аголот на намотување, додека аголот на намотување имал незначителен ефект врз јачината на компресија во аксијален правец. Со примена на поголеми агли на намотување, јачината на кинење во радијална насока се зголемувала додека во аксијална насока се намалувала. Анализите сила - напрегање покажале дека еластичните константи варираат со промена на аголот на намотување. Во друга студија овие автори го дискутирале оштетувањето на композитни цевки зајакнати со стаклени влакна од ± 55° под биаксијални оптоварувања (Soden et al., 1992). Експерименталните тестови биле изведени со примена на аксијални оптоварувања, придружени со внатрешен притисок додека односот помеѓу применетиот периферен стрес и аксијалното напрегање бил константен во текот на тестовите. При мало радијално оптоварување јачината на композитната цевка била значително намалена. Тестовите покажале дека еднооксијалната јачина на компресија била речиси двојно поголема од едноаксијалната јачина на истегнување, но аксијалната јачина на компресија била намалена поради присуството на високи периферни напони, во однос на аксијалната јачина на истегнување.

Satheesh Kumar Reddy со соработниците (Satheesh Kumar Reddy et al., 2012) го истражувале ефектот на аголот на намотување при различни услови на оптоварување со примена на методот на конечни елементи. Различни агли на намотување, број на слоеви и комбинирани услови на оптоварување биле земани во предвид. Резултатите покажале дека во зависност од условите на оптоварување може да се избере оптимален агол на намотување и материјал за масовна изработка на композитни цевки при најмали производни трошоци. Исто така, Hamed со соработниците (Hamed et al., 2007) го испитувале влијанието на

аголот на намотување при различни услови на оптоварување за композитни цевки изработени од Е – стаклени влакна и епоксидна смола отпорна на корозија и експерименталните тестови покажале дека изборот на оптимален агол на намотување зависи од применетото оптоварување.

Влијанието на аголот на намотување на влакната и затегањето при намотување врз структурните и механичките својства било испитувано за трапезоидни греди изработени од стаклени влакна/ епоксида смола со примена на технологија на намотување на филаменти од Risteska со соработниците (Risteska et al., 2014). Резултатите покажале дека со примена на поголем агол на намотување се постигнува помала јачина на свиткување и обратно. Примената на помали агли на намотување пак резултирало со помало присуство на пори. Во друга студија овие автори (Risteska et al., 2014) го испитуваат ефектот на аголот на намотување на влакната врз јачината на свиткување и модулот на еластичност при свиткување и оштетувањето на композитни цевки добиени од Е стаклен ровинг/ епоксидна смола. Резултатите од тестовите ги потврдиле теоретските калкулации дека со примена на повисоки агли на намотување јачината на свиткување се намалува, додека модулот на еластичност при свиткување се зголемува и обратно. Анализите извршени со оптички микроскоп покажале дека прогресот на оштетувањето низ внатрешните слоеви на композитните цевки е во трансверзална насока. Исто така, Svetlana Risteska со соработниците (Risteska et al., 2015) го истражувале влијанието на концентрацијата на растворувачот, брзината на намотување и затегнатоста на влакната врз содржината на смола, јачината на кинење и термичката стабилност на произведените композитни делови. Добиените резултати покажале дека со додавање на растворувачи во смолниот систем, како ацетон (40 %) за време на процесот на производство и примена на максимална брзина на намотување и затегнатост може да се добијат композити со помал масен удел на смола. Ова резултирало и со зголемување на термичката стабилност и процентот на пори во композитниот примерок и намалување на механичките својства.

Lakshmi Prasanna со соработниците (Lakshmi Prasanna et al., 2016) со примена на методот на конечни елементи пак го испитувале оптималниот агол на намотување на композитни цевки изработени од стаклени влакна (минимален волуменски удел од 50 %) и епоксидна смола врз основа на деформацијата сила

– напрегање. Резултатите покажале дека аголот од 90° е оптимален спирален агол за изработка на стакло/ епоксид композитните цевки. Во однос на деформацијата и напрегањето композитните материјали покажале слично однесување како конвенционалните материјали (челикот).

Поп Методиева со соработниците (Pop Metodieva et al., 2016 и Pop Metodieva, 2017) го истражувале дизајнот на композитни цевки со примена на технологија на намотување на филаменти преку примена на полн три факторен експеримент со земање на три фактори (брзина на намотување, јачина на истегнување и агол на намотување на влакната) кои најмногу влијаат на процесот и со нивно менување на две нивоа: минимална и максимална вредност. Врз основа на план-матрицата, биле направени 8 експерименти со менување на трите фактори на две нивоа (2^3). За добиените 8 композитни цевки експериментално била определена јачината на компресија. Врз основа на добиените резултати, била добиена адекватна регресиона равенка која најдобро го опишува влијанието на избраните фактори врз јачината на комресија. Резултатите покажале дека влијанието на брзината на намотување и тензијата на влакната, е минимално врз отпорноста на композитните цевки и дека скоро и да не постои интеракција помеѓу овие фактори. Истражувањата покажале дека аголот на намотување има најголемо (обратнопропорционално) влијание врз отпорноста на композитните цевки на компресија.

Srebrenkoska со соработниците (Srebrenkoska et al., 2015) експериментално ја испитувале јачината на истегнување и модулот на еластичност на композитни цевки врз основа на стаклени влакна/ епоксидна смола со помош на сплит – диск тест метода. Композитните цевки биле со различен дизајн т.е. со различни агли на намотување на влакната од 90º, 10º и 45º. Врз основа на добиените резултати заклучиле дека поголемиот агол на намотување на влакната во композитните цевки доведува до поголеми јачини на истегнување и оптимални вредности за јачината на истегнување се добиваат при агол на намотување на влакната од 45º. Во друга студија (Srebrenkoska et al., 2016) пак биле испитувани механичките и термичките својства на композитни цевки добиени со технологија на намотување на филаменти при различна брзина на намотување, затегнатост на влакната и агол на намотување во согласност со 2^3 полн три факторен експериментален дизајн. Од добиените резултати било констатирано дека

механичките својства на композитните примероци во голема мера зависат од аголот на намотување на влакната. Испитувањата покажале дека регресионата равенка од прв степен дала многу добра апроксимација на експерименталните резултати за јачината на истегнување и компресија на композитните цевки. Од резултатите за термичката карактеризација на композитните цевки, било констатирано дека сите композитни цевки имаат добра термичка стабилност и загуба на тежината била забележана во температурен интервал од 600 °C до 1000 °C.

Fitriaha со соработниците (Fitriaha et al., 2014) го дискутирале однесувањето при фактура на стаклени влакна/ епоксидна смола композитни цевки со различен дизајн (± 55°, ± 63°) при покачени температури. Резултатите покажале дека со зголемување на температурата, јачината на компресија значително се намалува и композитните цевки со агол на намотување од ± 55° имаат повисока јачина на компресија во споредба со композитните цевки со агол на намотување од ± 63°.

Karpuz (Karpuz, 2005) ги испитувал механичките карактеристики на композитни цевки при различни внатрешни притисоци со цел да го процени животниот век на композитните цевки за време на употребата. За изработка на тест примероците користел два вида на зајакнувачки влакна (јаглеродни и стаклени), две нивоа на затегање и пет различни агли на намотување (25°, 45°, 54°, 65°, 90°). Експерименталните тестови покажале дека композитните цевки зајакнати со јаглеродни влакна покажале подобри перформанси во споредба со цевките зајакнати со стаклени влакна, а максимални перформанси при пукање покажале цевките со конфигурација на агол од $[\pm 54°]_3[90°]_1$. Покрај тоа, било утврдено дека затегнатоста на влакната има незначително влијание врз перформансите при пукање.

Голем број на автори го истражувале влијанието и важноста на применетиот текстилен зајакнувач (од аспект на структурата, својствата, геометријата, ориентацијата во матрицата и сл.) врз физичко - механичките својства на композитните материјали. Во прилог се презентирани дел од студиите кои се значајни за оваа докторска дисертација.

Ishikawa и Chou (Ishikawa и Chou, 1982) презентирале метод за испитување на јачината и крутоста на композитни материјали зајакнати со ткаенини со

различен преплет. Авторите заклучиле дека крутоста и јачината кај композитите зајакнати со ткаенина во сатен преплет била поголема во споредба со онаа на композитите зајакнати со ткаенина во платно преплет како резултат на присуството на премостувачки региони во структурата на сатен преплетот.

Влијанието на примената на ткаенини со различен преплет врз интерламинарното напукнување на композитни материјали зајакнати со дводимензионални ткаенини пак е истражувано од Nidal Alifa со соработниците (Alifa et al., 1998). Пропагацијата на пукнатините по должината на основините и јаточните предива е испитувана за композитни материјали зајакнати со стаклена ткаенина во платно, кепер и 8 - жичен сатен преплет и за композитни материјали зајакнати со јаглеродна ткаенина во 5 - жичен сатен преплет. Како матрица во тестираните композитни материјали била користена епоксидна смола. Авторите дошле до заклучок дека отпорноста на деламинација и разликата во отпорноста на фрактура во насока на основата и јатокот се зголемува со зголемување на индексот на преплетот. Делумното поврзување на трансверзално ориентираните предива придонесува за зголемување на отпорноста на деламинација. Кривите на отпорност за стакло/ епоксид композитите со ткаенина во платно преплет биле речиси хоризонтални индицирајќи дека не настануваат речиси никакви промени за време на пропагацијата на напукнувањето, додека кривите за композитите со кепер и сатен преплет покажале одредено иницијално зголемување. Ова било резултат на анизотропијата во отпорноста на деламинацијата на овие композитни структури.

Авторите Naik, N. и Shembekar, P. објавиле голем број на трудови за влијанието на текстилниот зајканувач врз механичките својства на текстилните композити. Во I дел (Shembekar и Naik, 1992) развиле дводимензионален модел за анализа на еластичните својства на композитните материјали зајакнати со ткаенина во платно преплет. Во овој модел била земена во предвид влијанието на структурата на ткаенината (брановидноста и континуираноста на влакната во правец на основата и јатокот, присуството на меѓупростори помеѓу соседните предива, напречната геометрија на предивото и можната неурамнотежена природа на платно преплетот) врз еластичните својства на текстилните композити. Истражувањата биле продлабочени и влијанието на конфигурацијата на ламинатот и нивните релативни позиции едни во однос на други врз

еластичните својства на ламинатните композити било анализирано во II дел (Shembekar и Naik, 1992). Конфигурацијата на ламинатот со оптимални смени покажала поголеми еластични својства во споредба со другите конфигурации. Вредноста за модулот на еластичност за ламинатите зајакнати со ткаенина во платно преплет добиени со овој модел покажале добра корелација со експериментално добиените резултати. Во III дел бил испитуван (Nalik и Shembekar, 1992) ефектот на међу просторите помеѓу соседните предива и влијанието на конфигурацијата на ламинатот (различен број на слоеви во ламинатот) врз еластичните својства на ламинатите зајакнати со различни видови на текстилни материјали. Резултатите покажале дека со постоење на оптимален меѓупростор помеѓу соседните предива се добива повисок модул на еластичност и тоа пред се зависи од структурата на ткаенината и материјалниот систем. Споредбата на ламинатите зајакнати со ткаенина во однос на унидирекционалните ламинати покажала дека материјален систем со помал степен на ортотропија е пожелен за композитни материјали зајакнати со ткаенини. Во друг труд, авторите (Naik и Shembekar, 1993) презентирале метод за предвидување на еластичните својства на хибридни композити. Композитите биле изработени со комбинација на унидирекционални ленти и ткаенини. Еластичните својствата на хибридните композити ги споредувале со оние на унидирекционалните композити и дошле до заклучок дека хибридните композити може да понудат повисоки еластични својства во однос на унидирекционалните композити.

Aluga (Aluga, 2010) пак ја испитувал жилавоста на композитни материјали врз основа на епоксидна смола зајакнати со различни видови на ткаенини. Ударната жилавоста по Шарпи (EN ISO 179-1;2000) била испитувана за различни ламинатни плочи: јаглерод – арамид – јаглерод; јаглерод – јаглерод; јаглерод – јаглерод – стакло; стакло – јаглерод – јаглерод; стакло – стакло; стакло – стакло – стакло. Резултатите од испитувањето покажале дека најголема жилавост има композитната плоча составена од два слоја на јаглеродна ткаенина и еден слој на стаклена ткаенина и истата е четири пати поголема во споредба со композитните ламинати составени само од слој на јаглеродна или стаклена ткаенина.

Kukliński (Kukliński, 2011) го анализирал влијанието на содржината на пори врз механичките својства на композитни ламинати добиени со техника на рачно положување. Два типа на полиестерска смола (A 105 и K530) биле користени за матрица, а како зајакнувачка компонента била користен Е – стаклен мат со три различни површински маси (300, 450 и 600 g/m^2) и Е - стаклена ткаенина. Јачината на свиткување била тестирана според методот со три точки на свиткување (PN-EN ISO 14125). Врз основа на експерименталните тестови, Kuklińsk заклучил дека влијанието на процентот на пори врз максималната јачина на свиткување е големо и поголем процент на пори значително ги намалува механичките својства. Ако воздушните пори се залепени на влакното нивното штетно влијание врз механичките својства на ламинатот било поголемо отколку ако се во смолата. Исто така, испитувањата покажале дека површинската маса на зајакнувачот влијае врз пресметката на процентот на пори во композитниот материјал и дека бројот на слоеви во ламинатот влијае врз максималната јачина на свиткување на примерокот.

Basavaraj со соработниците (Basavaraj и Raghavendra, 2014) ја испитувале јачината на истегнување и свиткување на композитни ламинатни структури од Е -стаклени влакна/ епоксид добиени со примена на техника на рачно положување. Ламинатите биле изработени за три различни волуменски удел на составните компоненти (Е- стаклени влакна/ епоксид) и тоа 50:50, 40:60 и 35:65. Различните конфигурации на композитни ламинати биле моделирани во хипер мрежа и решени нумерички со примена на Abaqus софтверот за да се идентификува материјалот кој има највисока јачина на истегнување и свиткување. Авторите дошле до заклучок дека композитните ламинати со волуменски удел од 35:65 на стаклените влакна/ епоксид се оптимални, бидејќи јачината на истегнување и јачината на свиткување била поголема отколку кај останатите тестирани примероци. Својствата на свиткување на хибридните композити биле испитувани од авторите Dong и Davies, (Dong и Davies, 2012 и Dong et al., 2014).

Babukiran и Harish (Babukiran и Harish, 2014) го испитувале влијанието на типот на смолата и дебелината врз јачината и модулот на еластичност при свиткување кај композитни ламинати зајакнати со ткаенина од стаклени, графитни и јаглеродни влакна. Два типа на смоли биле користени за матрица: епоксидна и полиестерска смола. Авторите констатирале дека дебелината и

типот на смолата влијаат врз јачината на свиткување на композитните ламинати и примероците со епоксидна смола покажале поголема јачина на свиткување во однос на примероците со полиестерска смола. За иста дебелина и ориентација композитните примероци јаглерод/ епоксид покажале подобри својства на свиткување во споредба со композитните плочи зајакнати со стаклена и графитна ткаенина за двата вида на применети смоли. Со зголемување на дебелината на ламинатот, јачината на свиткување на композитните примероци се намалува. Спротивно на ова, Rathnakar и Shivanand, (Rathnakar и Shivanand, 2012 и Rathnakar и Shivanan, 2013) покажале дека мало зголемување на дебелината е препорачливо со цел да се зголемат својствата на свиткување на композитите примероци. Слични резултати биле објавени и од Davallo со соработниците (Davallo et al., 2010), кои покажале дека дебелината на ламинатот може да има витална улога врз механичките својства.

Јачината на свиткување и модулот на еластичност при свиткување на стакло - епоксид композитни плочи според стандардот ASTM D7264 е испитувана од Aarthy со соработниците (Aarthy et al., 2015). За ова цел биле произведени композитни ламинатни структури со различна дебелина (3 и 4 mm) од континуирани и сечкани стаклени влакна со примена на технологија на рачно положување. Експерименталните тестови покажале дека како резултат на добрата атхезија помеѓу стаклените влакна и епоксидната матрица постои значително подобрување на јачината на свиткување кај композитите со континуирани влакна отколку кај композитите со сечкани влакна, за иста дебелина на ламинатот.

Mijajlovikj со соработниците (Mijajlovikj et al., 2017) преку примена на полн 2^3 три факторен експериментален дизајн го испитувале влијанието на бројот на слоеви, применетиот притисок и насоката на влакната врз својствата на свиткување на Е -стакло/ епоксид композитни ламинати. Јачината на свиткување била тестирана според методот со три точки на свиткување (ASTM D790). Исто така, биле направена и СЕМ-анализа со цел да се види интерфејсот помеѓу матрицата и зајакнувачката компонента и присуството на пори. Резултатите покажале дека јачината на свиткување и модулот на еластичност при свиткување се зголемуваат во надолжна насока и дека насоката на влакната има директно влијае врз својствата на свиткување на композитните примероци.

3. ЦЕЛ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО (AIM OF RESEARCH)

Предмет на истражување во дисертацијата се композитните материјали врз база на текстилен зајакнувач во различна форма, технологиите за нивно добивање и споредба на нивните физичко - механички карактеристики од аспект на геометријата на текстилниот зајакнувач. Текстилните композити привлекуваат голем интерес од двете заедници: академската и индустриската. Ова семејство на материјали, во центарот на спектрите цена и перформанси, нуди значителни можности за нови апликации на полимерните композити. Изборот на постапките и условите на процесирање за добивање на текстилни композити се од особена важност, бидејќи во голем степен влијаат на својствата на добиениот материјал и цената на крајниот производ. Со познавањето на различните карактеристики на материјалите, релацијата структура – својства, како и постапките за процесирање на материјалите, може да се направи правилен и сигурен избор на материјали, согласно со дадените потреби. Покрај досегашниот напредок кој е постигнат во дизајнот на материјалите, сè уште постојат технолошки предизвици за дизајнирање пософистицирани и специјализирани материјали кои ќе одговорат на предизвиците од промените со кои се соочуваме денес.

Примарна цел на оваа докторска дисертација беше да се утврди влијанието и важноста на формата во која се користи текстилот како зајакнувачка компонента врз физичко - механичките својства на композитните материјали. Како зајакнувачки текстилен материјал беа избрани стаклени влакна пред се поради перформансите од аспект на односот јачина/ тежина, нивната достапност и ниската цена, а како полимерна матрица беше користен епоксиден смолен систем.

За реализација на поставената цел беа применети линеарни (ровинг) и дводимензионални текстилни структури со различни преплети како и комерцијално достапни унидирекционални (еднонасочни) стаклени препрези. Имено, за постигнување на поставената цел, истражувањата во рамките на докторската дисертација беа реализирани во два дела.

<u>*Првиот дел*</u> се однесува на примената на линеарните текстилни структури како зајакнувачка компонента во композитните материјали. За ова цел беа користени стаклени влакна во форма на континуиран ровинг за производство на

композитни цевчести структури со различен дизајн, со цел да се покаже влијанието на стаклениот ровинг (различниот агол на намотување на филаментот) врз физичко - механичките својства на текстилните композити.

Вториот дел се однесува на примената на дводимензионалните текстилни структури како зајакнувачка компонента во композитните материјали. За ова цел беа користени ткаени структури од стаклени влакна со различен преплет и стаклен неткаен текстил (мат со случајно ориентирани влакна) за добивање на препрези со соодветни карактеристики кои дополнително беа процесирани во композитни плочи со примена на технологијата на компресионо пресување.

Дополнително, беа изработени композитни плочи со технологија на компресионо пресување врз база на унидирекционален стаклен препрег.

За сите добиени текстилни композити беше направена карактеризација на физичките и механичките својства што претставува научен и потенцијален практичен интерес.

Сите истражувања кои беа направени во рамките на оваа докторска дисертација беа во функција на основната цел: детерминирање на влијанието и важноста на применетиот текстилен зајакнувач (од аспект на структурата, својствата, геометријата, ориентацијата во матрицата и сл.) врз постигнатите физичко - механички својства на композитните материјали и дефинирање на употребната вредност на текстилните материјали за различни апликации во композитната индустрија.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН ДЕЛ (EXPERIMENTAL PART)

Примарна цел на оваа докторска дисертација е да се утврди влијанието и важноста на формата во која се користи текстилот како зајакнувачка компонента врз физичко - механичките својства на композитните материјали. За оваа цел се користеа различни видови на текстилни структури изработени од стаклени влакна како зајакнувачка компонента, пред се поради ниската цена, нивната достапност како и перформансите од аспект на односот јачина/ тежина и епоксиден смолен систем како матрица. За производство на текстилните композити се применети соодветни современи технологии за нивно процесирање. Истражувањата се реализираа во два дела.

1 ДЕЛ: Примена на линеарни текстилни структури како зајакнувачка компонента за изработка на композитни цевчести структури со примена на технологија на намотување на филаменти.

2 ДЕЛ: Примена на различни видови на дводимензионални текстилни структури како зајакнувачка компонента за изработка на препрег со примена на технологија на рачна импрегнација и нивно дополнително процесирање во композитни плочи со примена на технологија на компресионо пресување.

Дополнително, со примена на истата технологија беа изработени и композитни плочи врз база на готов (комерцијален) унидирекционален стаклен препрег.

4.1 Примена на линеарни текстилни структури како зајакнувачка компонента во композитните материјали (Application of linear textile structures as reinforcement in composite materials)

4.1.1 Материјали користени за експериментите (Materials used for experiments)

Во првиот дел како зајакнувачка компонента се користеа линеарни текстилни структури (Е - стаклени влакна во форма на континуиран ровинг) за изработка на композитни цевчести структури со примена на технологија на намотување на филаменти. Композитните цевки се изработени со различен дизајн со цел да се покаже влијанието на различниот агол на намотување на стаклените влакна врз физичко - механичките својства на текстилните композити. За производство на композитните цевки се користеше Е – стаклен ровинг од типот P 185 со финост

од 1200 tex, производ на компанијата Owens Corning. Техничките карактеристики на зајакнувачката компонента EC1200 P185 се претставени во Табела 4. 1. Оптимални услови за чување на Е – стаклениот ровинг се температура од 10 – 35 °C и влажност помеѓу 35 – 85 %.

Табела 4. 1 Технички карактеристики на зајакнувачката компонента EC1200 P185
Table 4. 1 Technical characteristics of the reinforcement component EC1200 P185

Линиска маса / Linear weight (tex)	**Загуби при запалување/ Loss on ignition (%)**	**Влажност/ Moisture (%)**
ISO 1889; 1997	ISO 1887: 1995	ISO 3344: 1997
1200	0,6	< 0.20
Димензии на цилиндричната намотка/ Dimensions of cylindrical tube		
Должина/Length (m)	Висина/ Height (mm)	Нето тежина/Net weight (kg)
1700	260	21

Во текот на експерименталните тестови како матрица се користеше термореактивен смолен систем од компанијата Huntsman: Araldite® LY1135-1/Aradur 917/Accelerator 960-1. Карактеристиките на три компонентниот термореактивен систем кој претставува смеса од епоксидна смола, анхидриден вцврстувач и амински катализатор се дадени во Табела 4. 2. Овој смолен систем е наменет за производство на композитни делови со високи перформанси, лесен е за процесирање, има добри својства на импрегнација со влакната и покажува одлични механички и термички својства.

Во Табела 4. 3 даден е соодносот на поединечните компоненти, додека карактеристиките на смолниот систем се претставени во Табела 4. 4. Вискозноста на смолниот систем на температура од 25 °C е 600 - 1000 mPa·s, додека со зголемување на температурата истата се намалува. При температура од 23 °C, времето на работа на системот е од 56 до 62 часа. Во ова истражување смолата во кадата не беше загревана, што значи времето за работа беше доста долго. Вискозноста на смолниот систем беше 800 mPa·s, што е важно да се напомени за регулацијата на соодносот смола/ влакно. Времето на гелирање зависи од избраната температура за печење (80, 100, 110, 120, 130 или 140 °C).

Беше избрано композитните цевки да се печат на температура од 80 °C и на 140 °C во времетраење од четири часа на двете температури.

Табела 4. 2 Карактеристики на компонентите на смолниот систем
Table 4. 2 Characteristics of the components of the resin system

Araldite® LY 1135 - 1	
Аспект (визуелен)/ Aspect (visual)	Чиста, бледо жолта течност/ Clear, pale yellow liquid
Боја/Color (Gardner, ISO 4630)	≤ 2
Содржина на епоксид/ Epoxy content (ISO 3000)	5,30 – 5,45 [eg/kg]
Вискозност на 25°C/ Viscosity at 25°C (ISO 12058–1)	10000 – 12000 [mPa·s]
Густина на 25°C/ Density at 25°C (ISO 1675)	1,15 – 1,20 [g/cm^3]
Точка на палење/ Flash point (ISO 2719)	> 200 [°C]
Aradur ® 917	
Аспект (визуелен)/ Aspect (visual)	Чиста течност/ Clear liquid
Боја/Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 2
Вискозност на 25°C/ Viscosity at 25°C (ISO 12058–1)	50 – 10 [mPa·s]
Густина на 25°C/ Density at 25°C (ISO 1675)	1,20 – 1,25 [g/cm^3]
Точка на палење / Flash point (ISO 2719)	195 [°C]
Accelerator 960 – 1	
Аспект (визуелен)/ Aspect (visual)	Светло жолта течност/ Light yellow liquid
Боја/Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 8
Вискозност на 25°C/ Viscosity at 25°C (ISO 12058–1)	150 – 300 [mPa·s]
Густина на 25°C/ Density at 25°C (ISO 1675)	0,95 – 0,95 [g/cm^3]
Точка на палење / Flash point (ISO 2719)	110 - 120 [°C]
Температура на складирање/ Storage temperature	2 - 40 °C [°C]

Табела 4. 3 Соодност на компонентите
Table 4. 3 Ratio of the component

Компоненти/ Components	**Масен удел / Parts by weight**	**Волуменски удел/ Parts by volume**
Araldite® LY 1135 - 1	100	100
Aradul® 917	90	86
Accelerator 960 - 1	2 - 3	2,5 - 3,5

Табела 4. 4 Карактеристики на смолниот систем
Table 4. 4 Characteristics of the resin system

Почетна вискозност на мешавината / Initial mix viscosity (HOEPPLER, ISO 12058-1B)	[°C] на 25 на 40 на 60		[mPa·s] 600-1000 200-300 < 75	
Постигната вискозност / Viscosity build - up (HOEPPLER, ISO 12085-1B)	Компоненти [pbw]/ Components [pbw] Araldite® LY 1135 - 1 Aradul® 917 Accelerator® 960 - 1		Систем 1/ System 1 100 90 3	Систем 2/ System 2 100 90 5
Време на работа на системот/ Pot life (TECAM, 65 %RH, 100 G)	[°C] на 23 на 40	 [h] [h]	 56-62 11-15	 18-24 4-7
Време на гелирање/ Gel time (hot plate)	[°C] на 80 на 100 на 110 на 120 на 130 на 140	 [min] [min] [min] [min] [min] [min]	Систем 1/ System 1 15-21	Систем 2/ System 2 52-60 10-15 5-8 3-5 1,5-3 1-2
Типични циклуси на вмрежување/ Typical cure cycles	Гелирање на/ Gelation either или/or Пост – вмрежување на/ Post-cure either Или/or			2-4 h на 80 °C 1-3 h на 90 °C 4-8 h на 120°C 2-8 h на 140°C

4.1.2 Производство на полимерните композитни цевки (Production of the polymer composite pipes)

Композитните цевчести структури се изработени со примена на технологија на намотување на филаменти. Лабораториските експерименти се изведени во лабораториите на Институтот за современи композити и роботика во Прилеп. За производство на композитните цевки се користеа 10 цилиндрични намотки на Е -стаклени влакна од типот EC1200 P185, производ на компанијата Owens Corning и три компонентен епоксиден систем од Huntsman: Araldite LY1135-1/Aradur 917/Accelerator 960-1. Примероците се произведени со помош на лабораториската машина за намотување на филаменти, тип MAW FB 6/1 со шест оски, ролерски тип и када за смола, производ на компанијата Микросам АД (сл.

4. 1). Композитни цевки се изработени со различен дизајн со цел да се покаже улогата на стаклените влакна во добивањето на композитни структури. Другите параметри кои влијаат на крајните карактеристики на композитните цевки како што се: затегнатоста (тензијата) на влакната, брзината на намотување на влакната, вискозитетот на смолниот систем и процентот на полимерна матрица со која се натопени влакната, беа земени како константни вредности врз основа на практичното искуство на Институтот за современи композити и роботика во Прилеп.

Слика 4. 1 Производство на композитни цевки со различен агол на намотување (10º, 45º и 90º) на машина за намотување на филаменти MAW FB 6/1
Figure 4. 1 Production of composite pipes with different angles of winding (10º, 45º and 90º) on filament winding machine MAW FB 6/1

За добивање на композитните цевки се користеа следниве параметри:

- Затегнатост на стаклените влакна при намотувањето - **47 N;**
- Брзината на намотување на импрегнираните стаклени влакна - **13,125 m/min**;
- Вискозитетот на смолниот систем - **800 mPa·s**;
- Масен сооднос на влакната и смолата за сите композитни цевки - **(75:25) %**

Како променлив параметар е земен аголот на намотување и се произведени композитни цевки со различен дизајн т.е. со различни агли на намотување на стаклените влакна од **10º, 45º** и **90º**. Аголот на намотување е агол помеѓу влакното и линијата на површината на мандрелот која е паралелна на оската на

мандрелот. Често се преферира спирален агол на намотување на влакната (±θ). Меѓутоа многу често може да се намотуваат влакната под агол блиску до 90º или под агол блиску до 10º (во краен случај). Со примена на различни агли на намотување на влакната во однос на оската на мандрелот, може да се произведат композитни структури кои можат да издржат различни видови на оптоварувања во насока на влакната.

После намотувањето на влакната на мандрелот, примероците беа печени со индустриски грејач на 80 ºC и на 140 ºC во времетраење од четири часа на секоја од температурите, а потоа беа извлечени од мандрелот. Произведените композитни цевки се претставени на Слика 4. 2.

Слика 4. 2 Изглед на произведените композитни цевки
Figure 4. 2 Appearance of the manufactured composite pipes

4.1.3 Методи за испитување на физичко - механичките својства на полимерните композитни цевки (Methods for examination of physical and mechanical properties of polymer composite pipes)

За испитување на физичко - механичките својства на полимерните композитни цевки се користеа стандардни методи и постапки. Една од најзначајните карактеристики која е круцијална за дефинирање на квалитетот на овој вид на композитни структури е нивната издржливост на високи притисоци. Поради тоа, најчеста механичка карактеристика која се испитува кај композитните цевчести структури е јачината на истегнување. Со помош на сплит – диск тест метода (стандардот ASTM D2290) е тестирана јачината на истегнување на добиените композитните цевки (ASTM D2290, 2013). Содржината на конституентите во композитните цевчести структури се испитуваше според стандардот ASTM D3171 (ASTM D3171, 2015).

4.1.3.1 Определување на содржината на составните компоненти во композитните примероци (Determination of the content of the constituent components in the composite samples)

Определувањето на содржината на составните конституенти на композитниот материјал е значајно од аспект на моделирање на својствата (механички, физички, термички или електрични) на композитната структура кои зависат од зајакнувачката компонента или матрицата. За да може текстилните влакна да се користат како ефикасна зајакнувачка компонента постои одреден минимален односно максимален удел на влакна кој може да биде присутен во композитната структура. Имено, доколку содржината на влакна во композитот е помала од некоја минимална вредност, тоа може да резултира со добивање на композит со мала јачина, затоа што јачината во голема мера ќе биде детерминирана од јачината на полимерната матрица. Од друга страна, ако пак влакната се присутни во композитот во многу голем процент односно повеќе од некоја максимална дозволена вредност, тогаш тие нема да бидат меѓу себе добро поврзани со полимерна матрица и на тој начин повторно ќе се добие композит кој нема да има добра јачина. Во овој случај зајакнувачката фаза нема да биде ефективно искористена. Следењето на присуството на полимерна матрица во композитната структура е исто така важно за да се обезбеди добро натопување и поврзување на влакната, односно конзистентност на процесот на производство

на композитни материјали. Познавањето на содржината на составните компоненти е исто така неопходно за евалуација на квалитетот на произведениот композитен материјал и на процесите кои ќе се користат за време на изработката.

За определување на содржината на конституентите во композитните примероци беше користен стандардот ASTM D3171 (ASTM D3171, 2015). За да може да се определи содржината на зајакнувачката компонента и на полимерната матрица во композитните прстенести примероци неопходно е да се знае теоретската густина на конститутивните материјали односно на стаклените влакна и на епоксидната матрица, а со тоа може да се определи и теоретската густина на композитот. Индивидуалните густини на конституентите најчесто се добиваат како готови вредности од производителот и при пресметките земена е густина на стаклените влакна од 2,56 g/cm^3 и густина на епоксидната смола од 1,15 g/cm^3.

За определувањето на густината на композитниот материјал, примерок со определени димензии и претходно измерена тежина се става во огноотпорен сад и се гори (жари) во муфлова печка на температура од 600 ºC се додека полимерната матрица не согори комплетно, односно се додека не остане само зајакнувачката компонента. Потоа, огноотпорниот сад со примерокот се лади и се мери неговата тежина. Најчесто, примерокот кој се гори е со димензии: ширина 2,54 cm x висина 2,54 cm x дебелина. Врз основа на расположливите податоци може да се пресмета масениот удел на зајакнувачката компонента во проценти.

Масениот удел на зајакнувачката компонента во проценти (%) е пресметан според равенката 4.1:

$$W_r = \left(M_f/M_i\right) \times 100 \qquad [4.1]$$

каде што:

M_i = почетна маса на примерокот пред согорување, g и

M_f = финална маса на примерокот по согорување, g.

Масата на зајакнувачката компонента може да се добие со одземање на масата на огноотпорниот сад од масата на огноотпорниот сад заедно со зајакнувачот ($M_f = M_{cr} - M_c$).

M_c = маса на огноотпорниот сад,

M_{cr}= маса на огноотпорниот сад заедно со остатокот од зајакнувачката компонента.

Волуменскиот удел на зајакнувачката компонента во проценти (%) е определен во согласност со равенката 4.2.

$$V_r = (M_f/M_i) \times 100 \times q_c/q_r \quad [4.2]$$

каде што:

q_c = густина на композитниот примерок, g/cm^3,

q_r = густина на зајакнувачката компонента, g/cm^3.

Масениот удел на матрицата во проценти (%) е пресметан со примена на равенката 4.3.

$$W_m = ((M_i - M_f)\ /M_i) \times 100 \quad [4.3]$$

Волуменскиот удел на матрицата во проценти (%) е определен во согласност со равенката 4.4.

$$V_m = ((M_i - M_f)\ /M_i) \times q_c/q_m \times 100 \quad [4.4]$$

каде што:

q_m = густина на матрицата, g/cm^3.

Теоретската густината на композитните примероци е пресметана со користење на равенката 4.5:

$$T_d = \frac{100}{W_m/q_m + W_r/q_r} \quad [4.5]$$

каде што:

T_d = теоретска густина на композитот, g/cm^3,

W_m = масен удел на смола, %,

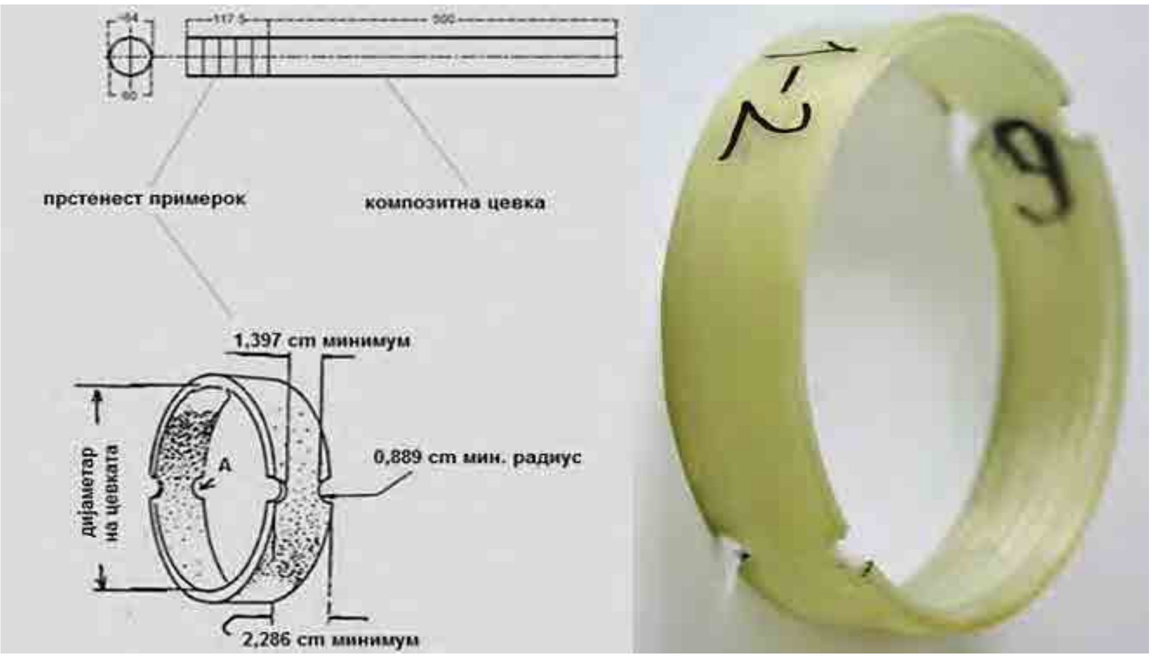
W_r = масен удел на зајакнувачката компонента во проценти (%),

q_m = густина на смола, g/cm^3,

q_r = густина на зајакнувачката компонента, g/cm^3.

4.1.3.2 Определување на јачината на истегнување (Determination of tensile strength)

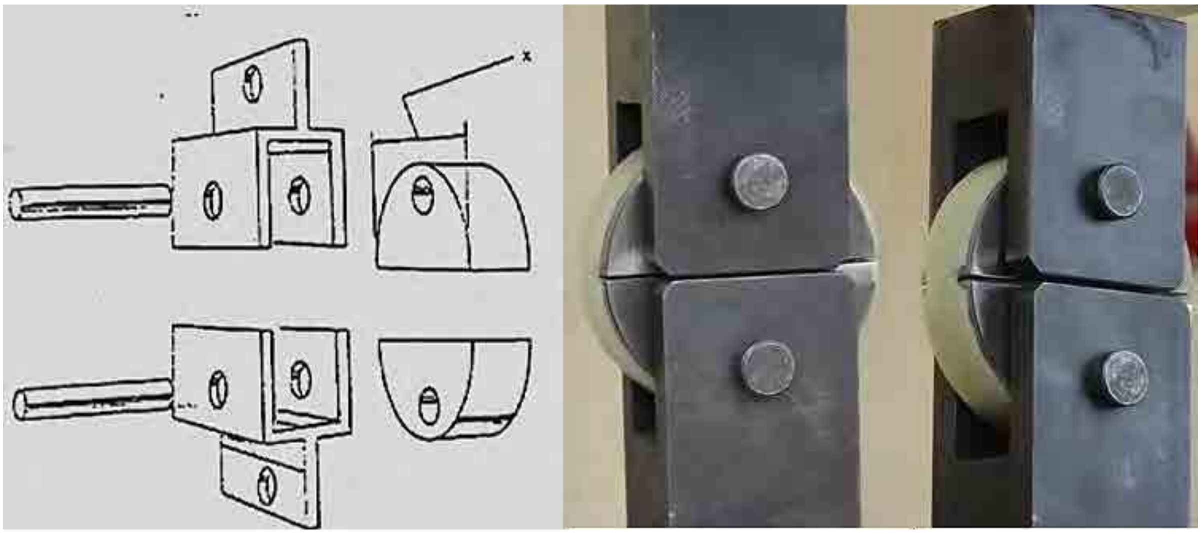
За испитување на јачината на истегнување на композитните цевки беше користен стандардот ASTM D2290 (ASTM D2290, 2013). Согласно со барањата на овој стандард од секоја композитна цевка се сечат по 7 прстенести примероци за тестирање (сл. 4. 3) и дополнително е извршена нивна машинска обработка. Ширината и дебелината на секој од примероците беше измерена со помош на микрометар со точност од 0,0254 mm.



Слика 4. 3 Изглед на прстенест примерок за тестирање на јачината на истегнување

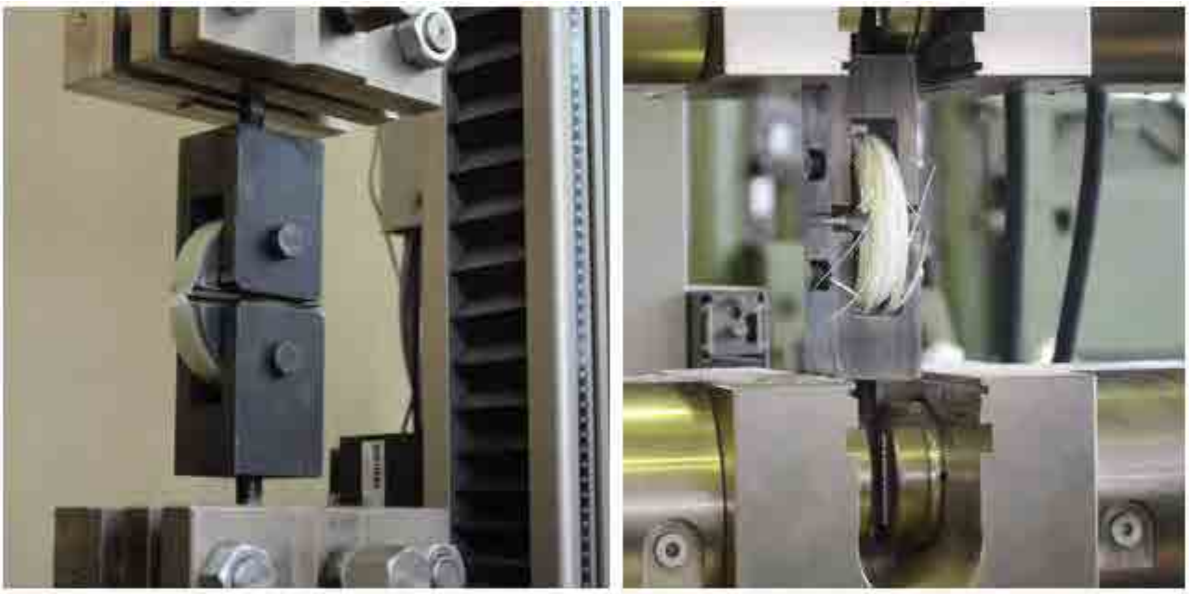
Figure 4. 3 Illustration of split-disk test specimen for tensile testing

За тестирање на композитните прстенести примероци потребно беше да се користи специјален помошен алат (во форма на дводелен диск), а истиот беше изработен од Микросам АД според барањата на ASTM D2290. Примероците се поставуваат во помошниот алат, така што ослабените делови на примерокот се во правец на линијата на разделување на двете половини од дискот (сл. 4. 4).



Слика 4. 4 Изглед на помошен алат заедно со примерокот за тестирање на јачината на истегнување
Figure 4. 4 Illustration of test fixture with specimen for tensile testing

За испитување на јачината на истегнување на прстенестите примероци се користеа два типа на машини и тоа: универзална машина за тестирање Zwick/Roell Z050 со максимална сила од 50 KN и Zwick/Roell Z400 со максимална сила од 400 MPa и брзина на тестирање од 0,3 inch/min (сл. 4. 5).



а) б)

Слика 4. 5 Универзална машина за испитување на јачина на истегнување:
а) Zwick/Roell Z050 со максимална сила од 50 KN и б) Zwick/Roell Z400 со максимална сила од 400 MPa
Figure 4. 5 Universal testing machine: a) Zwick/Roell Z050 with max load of 50kN and b) Zwick/Roell Z400 with max stress of 400MPa

Условите за испитување на тест примероците се: 23 ± 2 °C или собна температура и релативна влажност на воздухот од 50 ± 5 % и тоа не помалку од 24 часа пред да се почне со тестирањето. Тестирањето е изведено при константна брзина на раздвојување на половинките од дискот се додека не настане кинење на примероците. За секоја испитувана група на прстенести примероци се пресметува средна аритметичка вредност од измерените крајни јачини на истегнување.

Крајната јачина на истегнување на композитните примероци е пресметана со примена на равенката 4.6:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{2 \cdot A_m} \qquad [4.6]$$

каде што :

σ – крајна јачина на истегнување, MPa,

F_{max} – максимална сила на кинење, N,

A_m – површина на попречниот пресек на ослабениот дел на прстенот, d x b, mm^2.

Исто така, е пресметана и средната вредност на модулот на еластичност при истегнување. Кривите напрегање – деформација се изработени врз основа на добиените вредности за силата и поместувањето од тестирањето на прстенестите примероци. Кривата напрегање - деформација има еден линеарен дел. Со примена на методот на најмали квадрати се опишува линеарна крива за да се пресмета модулот на еластичност (E). Освен овој начин за пресметување на модулот на еластичност се користи и равенката 4.7:

$$E_h = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \qquad [4.7]$$

каде што:

E_h- модул на еластичност на прстенот, GPa,

$\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$- наклон на линеарниот дел од кривата напрегање – деформација.

4.1.4 Карактеризација на површината на добиените композитни цевки по фрактура (Characterization of the surface of the composite pipes after fracture)

За испитување на внатрешната структура на материјалите добиени при одреден технолошки процес или за испитување на последиците како резултат на некое механичко оптоварување се користат најразлични видови на микроскопи. Оптичките микроскопи најпрво се појавиле, додека денес најголема примена имаат електронските микроскопи.

Со цел да се истражат промените во структурата на композитните прстенести примероци по фрактура, интерфејсот помеѓу зајакнувачката компонента (E - стаклените влакна) и матрицата, присуството на пукнатини во матрицата, присуството на пори и областите каде не настанал прекин изработени се слики на скенирачки електронски микроскоп VEGA3 LMU од фирмата Tescan (сл. 4. 6). Електронските слики на тестираните композитни прстенести примероци се изработени во лабораторијата за електронска микроскопија при Универзитетот „Гоце Делчев“ - Штип.

Слика 4. 6 Скенирачки електронски микроскоп VEGA3 LMU од фирмата Tescan
Figure 4. 6 Scanning electron microscope VEGA3 LMU from company Tescan

4.2 Примена на дводимензионални текстилни структури како зајакнувачка компонента во композитните материјали (Application of two - dimensional textile structures as reinforcement in composite materials)

Втора цел во рамките на докторската дисертација е да се покаже влијанието на различните видови на дводимензионални текстилни структури како зајакнувачка компонента врз физичко - механичките својства на композитните материјали. За оваа цел се користеа следниве конституенти:

1. **Ткаени структури од Е стаклени влакна со различен преплет;**
2. **Стаклен Е неткаен текстил (мат со случајно ориентирани влакна).**

Покрај овие дводимензионални текстилни структури како зајакнувачка компонента дополнително е применет и готов **Е - унидирекционален стаклен препрег**.

Со примена на технологија на импрегнација (рачно полагање) од сите дводимензионални текстилни структури се изработија препрези со соодветни карактеристики кои дополнително беа процесирани во композитни плочи со примена на технологија на компресионо пресување. Во текот на овие експериментални тестови за добивање на преимпрегнираните материјали како матрица беше користен двокомпонентен термореактивен систем од епоксидна смола (D.E.R 3821) и вцврстувач (Polypox H 766). Техничките карактеристики на компонентите на смолниот систем се претставени во Табла 4.5.

Табела 4. 5 Карактеристики на компонентите на смолниот систем
Table 4. 5 Characteristics of the components of the resin system

Епоксидна смола (D.E.R 3821)/ Epoxy resin (D.E.R 3821)	
Еквивалентна тежина на епоксидот/ Epoxide equiv. weight (g/eq)	176 – 183
Процент на епоксид/ Epoxide percentage (%)	23,5 – 24,4
Содржина на епоксидни групи/ Epoxide group content (mmol/kg)	5460 – 5680
Боја/ Color (Platinum cobalt)	125 Max.
Вискозитет@ 25°C/ Viscosity @ 25°C (mPa·s)	9000 – 10500
Содржина на хидролизиран хлор/	500 Max.

Hydrolyzable chlorine cont. (ppm)	
Содржина на вода/ Water content (ppm)	700 Max.
Густина @ 25°C / Density @ 25°C (g/ml)	1,16
Содржина на епихлорохидрин/ Epichlorohydrin content (ppm)	5 Max.
Рок на траење (Месеци)/ Shelf life (Months)	24
Polypox H 766	
Густина на 25°C/ Density at 25°C, [g/cm^3]	0,94 ± 0,05
Вискозност на 25°C/ Viscosity at 25°C, [mPa·s]	14
Број на амини/ Amine number [mg KOH/g]	540 ± 15
H – еквивалентна тежина/ H – equivalent weight [g/Equiv.]	55
Боја/ Colour (Gardner)	сина

4.2.1 Ткаени структури од Е стаклени влакна со различен преплет (Woven structure of E - glass fibers with different weave pattern)

Три типа на ткаени структури од Е стаклени влакна со различен начин на преплетување на основините и јаточните жици (преплет) се користеа за добивање на препрези со примена на технологија на рачно полагање. Техничките карактеристики на применетите Е- стаклени ткаенини се дадени во Табела 4 6 соодветно.

За секоја од употребените Е - стаклени ткаенини со примена на стандардни методи се определени:

- Структурните карактеристики;
- Карактеризација на структурата на применетите текстилни материјали со скенинг електронска микроскопија (СЕМ);
- Основните физичко - механички својства (јачина на истегнување и издолжување при кинење во надолжен и напречен правец и модул на еластичност).

Табела 4. 6 Технички карактеристики на Е - стаклените ткаенини
Table 4. 6 Technical characteristics of E - glass fabrics

Карактеристика/ Characteristic		Примерок 1/ Sample 1	Примерок 2/ Sample 2	Примерок 3/ Sample 3
Тип на преплет/ Type of weave		Платно/ Plain	Кепер 2x2/ Twill 2x2	Панама/ Basket
Површинска маса (g/m²)/ Density (g/m²)		300±20	320±20	320±25
Дебелина (mm)/ Thickness (mm)		0,3	0,32±0,05	0,31
Ширина (cm)/ Width (cm)		2000	92	100
Број на предива/ Count (ends/cm)	Основа/ Warp	8±1	8±1	6±1
	Јаток/ Weft	7±1	6±1	5±1
Јачина на кинење/ Strength (N/25mm)	Основа/ Warp	≥2000	≥2000	≥1800
	Јаток/ Weft	≥1800	≥1400	≥1200

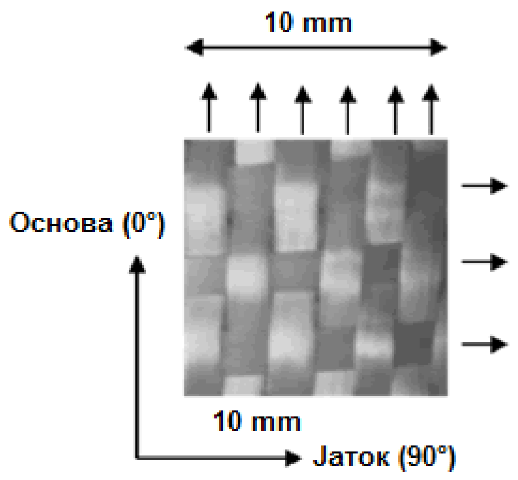
4.2.1.1 Определување на структурните карактеристики на применетите дводимензионални текстилни структури (Determination of the structural characteristics of applied two - dimensional textile structures)

Структурните карактеристики на ткаенините имаат суштествено влијание врз физичко - механичките својства и надворешниот изглед на ткаенините. Најчесто се определени од преѓите од кои се изработени како и од процесните параметри на машините за ткаење. Во основните структурни карактеристики на ткаенините спаѓаат: суровинскиот состав на ткаенината, масата на единица површина, финоста на преѓата за основа и јаток, густината на ткаенината по основа и јаток (број на основини и јаточни жици на единица должина), тип на преплет (начинот на преплетување на основините и јаточните жици) и слично.

Површинската маса (g/m²) на применетите Е - стаклени ткаенини е определена преку мерење на масата на примероци со димензии 100 x 100 mm според стандардот ASTM D3776 (ASTM D3776, 2002). Резултатите претставуваат средна вредност од 5 мерења на прецизна електронска вага при стандардни услови.

Густината на ткаенината по основа и јаток го означува бројот на основини и јаточни жици распоредени на единица должина, односно ширина на

ткаенината (сл. 4. 7). Се работи за должина од 1 cm или 1 dm, па густината на жиците се изразува во cm^{-1} или dm^{-1}. Густината на ткаенината е одредена мануелно со помош на специјална лупа за густина, која се состои од стакло за зголемување и квадратен отвор, кои се поставени на одредено растојание. Страната на квадратниот отвор е 1 cm, а површината е 1 cm^2. Густината на Е-стаклените ткаенини по основа и јаток е определена според стандардот BS EN 1049-2 (BS EN 1049-2, 1994).



Слика 4. 7 Густината на ткаенината во правец на основата и јатокот
Figure 4. 7 Density on the woven fabrics in warp and weft direction

4.2.1.2 Карактеризација на структурата на применетите текстилни материјали со скенинг електронска микроскопија (Characterization of the structure of applied textile materials with scanning electron microscopy)

Електронски микрофотографии на структурата на користените Е - стаклени ткаенини се направени со користење на бинокуларен микроскоп ZOOM 645 и скенирачки електронски микроскоп тип VEGA3 LMU од фирмата Tescan (сл. 4. 6). Овие фотографии се направени со цел да се уочат разликите во структурата на применетите стаклените ткаенини односно начинот на преплетување на двата основни системи на жици (основините и јаточните).

4.2.1.3 Определување на основните физичко - механички карактеристики на применетите дводимензионални текстилни структури (Determination of the basic physical - mechanical characteristics of applied two - dimensional textile structures)

Од физичко - механичките карактеристики на Е - стаклените ткаенини извршени се испитувања на јачината на истегнување и издолжувањето при кинење во надолжен и напречен правец според стандардот ASTM D 5035 (ASTM D5035, 2003). За ова испитување користена е универзална машина за тестирање на јачина на истегнување „Schenk“ (сл. 4. 9). Јачината на истегнување на ткаенините е една од најважните механички својства што ги прави супериорни за многу индустриски апликации во споредба со плетените и неткаените текстилни материјали.

За реализација на ова испитување, од сите три типа на Е - стаклени ткаенини се исечени по три примероци (ленти) во насока на основата и три примероци во насока на јатокот со димензии (200 x 48 mm), (сл. 4. 8).

Слика 4. 8 Подготовка на примероци од ткаенините за испитување на јачината на кинење
Figure 4. 8 Preparation of glass fabric samples for testing the tensile strength

Примероците се прицврстени во тест машината со помош на 60 mm широки клеми, (сл. 4. 9). Резултатите се средни вредности од три мерења на јачината на кинење во правец на основа и јатокот и издолжувањето до кинење.

Слика 4. 9 Испитување на јачина на кинење на универзална машина за тестирање „Schenk“
Figure 4. 9 Tensile strength test of universal test machine „Schenk"

Деформацијата на истегнување, односно процентното растегнување е добиено со примена на равенката 4.8:

$$\varepsilon\,(\%) = \frac{\Delta L}{L} \cdot 100 \qquad [4.8]$$

каде што:

ε – деформацијата на истегнување, во %;

ΔL – издолжување на примерокот;

L – почетна должина на примерокот.

4.2.2 Е - стаклен неткаен текстил (E - glass nonwoven textile)

Друг вид на дводимензионална текстилна структура која беше користена како зајакнувачка компонента за изработка на препрег е Е - стаклен неткаен текстил (мат со случајно ориентирани влакна). Стаклениот мат е добиен со сечкање на Е - стаклени влакна со должина од 50 mm кои меѓусебно се поврзани со емулзионен сврзувач. Техничките карактеристики на применетиот неткаен текстил се дадени во Табела 4. 7. За определување на површинската маса (g/m^2) на применетиот неткаен текстил е користен стандардот ASTM D3776 (ASTM D3776, 2002). Резултатите претставуваат средна вредност од 5 мерења на прецизна електронска вага при стандардни услови.

Табела 4. 7 Технички карактеристики на Е – стаклен неткаен текстил
Table 4. 7 Technical characteristics of E-glass nonwoven textile

Површинска маса/ Weight (g/m^2)	Загуба при согорување/ Loss of ignition (%)	Содржина на влага/ Moisture content (%)	Ширина/ Width (cm)
300	4,5	< 30	125

4.2.3 Е - унидирекционален стаклен препрег (E - unidirectional glass prepreg)

Дополнително, композитни плочи беа изработени и од готов Е – унидирекционален стаклен препрег како зајакнувачка компонента. Техничките карактеристики на користениот Е- стаклен препрег се дадени во Табела 4. 8.

Табела 4. 8 Технички карактеристики на Е - унидирекционален стаклен препрег
Table 4. 8 Technical characteristics of E - unidirectional glass prepreg

Карактеристика/ Characteristic	**Вредности/ Values**
Површинска маса на препрег (g/m^2)/ Prepreg area weight (g/m^2)	600
Површинска маса на влакна (g/m^2)/ Fiber areal weight (g/m^2)	390
Ширина (cm)/ Width (cm)	420
Тип на смола/ Resin type	Епоксидна/ Epoxy
Содржина на смола %/ Resin content %	35
Тип на влакно/ Fiber type	Е- стакло/ E - glass

4.2.4 Производство на препрег и полимерни композитни плочи (Production of prepreg and polymer composite plates)

За истражувањата во склоп на оваа дисертација со примена на технологија на импрегнација (рачно полагање) се изработени препрези (ламинати) од дводимензионалните Е - стаклени материјали (трите типа на ткаенини и неткаениот текстил). Дополнително беше применет и готов (комерцијално достапен) Е - унидирекционален стаклен препрег. Со примена на технологија на компресионо пресување од сите препрези беа изработени композитни плочи. Лабораториските експерименти се изведени во лабораториите на Институтот за современи композити и роботика во Прилеп.

Првиот чекор на ова истражување се состои во тоа што од секој примерок на применетите дводимензионални текстилни структури (Е- стаклените ткаенини, Е- стаклениот мат) се сечат правоаголни парчиња со одредени димензии (250 x 200 mm). Од секој материјал се исечени по 20 (дваесет) парчиња, со цел да се направат по две проби (композитни плочи).

Врз основа на практичните искуствата на Институтот за современи композити и роботика во Прилеп и според спецификациите, двокомпонентниот смолен систем (епоксидна смола (D.E.R 3821) и вцврстувач (Polypox H 766)) го подготвивме по одреден соодност 100:32. Соодносот е дефиниран со помош на лабораториска вага, каде и двете супстанции (смола/ вцврстувач) се соединуваат и со нивно постепено промешување се добива соединета двокомпонентна смеса (сл. 4. 10).

Подготвениот двокомпонентен смолен систем се нанесува т.е. се распределува подеднакво преку целата површина на примероците од текстилен материјал со помош на импровизиран ролер, кој го регулираме рачно. Секој пакет од препрег материјал се состои од 10 слоеви. Единствено, пакетот од готов Е - унидирекционален стаклен препрег се состои од 8 слоеви. Во Табела 4. 9 е даден редоследот на изработка и соодветното означување на пакетите од препрег.

Слика 4. 10 Двокомпонентен смолен систем: епоксидна смола (D.E.R 3821) и вцврстувач (Polypox H 766))
Figure 4.10 Two component resin system: epoxy resin (D.E.R 3821) and hardener (Polypox H 766))

Табела 4. 9 Редослед на изработка на пакетите од препрег
Table 4. 9 Order of preparation of prepreg packages

Тип на текстилен материјал/ Type of fabric	Број на проба/ Sample number	Број на парчиња текстилен матер./ Number of pieces of fabric	Надолжна димензија (MD)/ Longitudinal dimension (MD)	Напречна димензија (CD)/ Transverse dimension (CD)	Соодност смола :вцрснувач/ Ratio resin: hardener
Пакет од препрег од Е - стаклени ткаенини/ Е - glass fabric prepreg package					
Примерок 1 Sample 1	**I**	10	250	200	100 : 32
	II	10	250	200	100 : 32
Примерок 2 Sample 2	**III**	10	250	200	100 : 32
	IV	10	250	200	100 : 32
Примерок 3 Sample 3	**V**	10	250	200	100 : 32
	VI	10	250	200	100 : 32
Пакет од препрег од Е - неткаен текстил/ Е - nonwoven prepreg package					
Примерок 4 Sample 4	**VII**	10	250	200	100 : 32
	VIII	10	250	200	100 : 32
Пакет од Е - унидирекционален препрег/ Е - unidirectional prepreg package					
Примерок 5 Sample 5	**IX**	8	250	200	
	X	8	250	200	

Постапноста на нанесување смола т.е. редењето на слоевите се прави на рамна површина така што шематски се одвива во насока: текстилен материјал - смолен систем - текстилен материјал (сл. 4. 11).

Слика 4. 11 Нанесување на смола на примерок од Е - стаклена ткаенина
Figure 4.11 Application of resin on sample from E - glass fabric

а)

б)

Слика 4. 12 Изглед на а) пакет од препрег I, III и V б) пакет од препрег II, IV и VI
Figure 4.12 Appearance of a) prepreg packages I, III and V b) prepreg packages II, IV and VI

Откако пакетите од препрег материјал се подготвени (сл. 4. 12), ги обвиткуваме со огноотпорна хартија и внимателно ги поставуваме во прес апаратот (сл. 4. 13). Подготвените преимпрегнирани материјали од трите типа на стаклени ткаенини и Е стаклениот мат се пресуваат на соодветен притисок (30 bar и 40 bar) при претходно зададена температура. Примероците се оставаат да отстојат во прес апаратот еден час. За времетраењето на процесот првиот половина час примероците се на температура од 70°C, остатокот од времето температурата рачно се зголемува на 80°C. Така приготвените примероци се оставаат да отстојат неколку часа се додека смесата целосно не се соедини и исуши. Откако ќе отстојат еден ден, композитните примероци се подготвени за понатамошни испитувања.

Подготвените пакети од готов Е - унидирекционален препрег се пресуваат 1 час на соодветен притисок (30 bar и 40 bar) и температура од 130°C. Условите на изработка на композитните плочи се дадени во Табела 4.10.

Слика 4. 13 Прес апарат
Figure 4. 13 Pressure instrument

Табела 4. 10 Услови на изработка на композитните плочи
Table 4. 10 Conditions of making the composite plates

Тип на текстилен материјал/ Type of fabric	Број на проба/ Sample number	Број на парчиња текстилен матер. / Number of pieces of fabric	Температура (℃)/ Temperature (℃)	Притисок (bar)/ Pressure (bar)	Време (min)/ Duration (min)
Пакет од препрег од Е - стаклени ткаенини/ E - glass fabric prepreg package					
Примерок 1 Sample 1	**I**	10	70℃	30 bar	30 min
			80℃		30 min
	II	10	70℃	40 bar	30 min
			80℃		30 min
Примерок 2 Sample 2	**III**	10	70℃	30 bar	30 min
			80℃		30 min
	IV	10	70℃	40 bar	30 min
			80℃		30 min
Примерок 3 Sample 3	**V**	10	70℃	30 bar	30 min
			80℃		30 min
	VI	10	70℃	40 bar	30 min
			80℃		30 min
Пакет од препрег од Е - неткаен текстил/ E - nonwoven prepreg package					
Примерок 4 Sample 4	**VII**	10	70℃	30 bar	30 min
			80℃		30 min
	VIII	10	70℃	40 bar	30 min
			80℃		30 min
Пакет од Е - унидирекционален препрег/ E - unidirectional prepreg package					
Примерок 5 Sample 5	**IX**	8	130 ℃	30 bar	60 min
	X	8	130 ℃	40 bar	60 min

4.2.5 Методи за испитување на својствата на полимерните композити плочи (Methods for testing properties of polymer composite plates)

За испитување на механичките својства на полимерните композитни плочи се користат стандардни методи и постапки. Јачината на свиткување и модулот на еластичност при свиткување се испитувани според стандардот EN ISO 14125 (EN ISO 14125, 1998). Содржината на конституенти е определена според стандардот ASTM D3171 (ASTM D3171, 2015), додека содржината на пори во композитните примероци е определена според стандардите ASTM D792/ ASTM D2734/ ASTM D2584 (ASTM D792, 2008; ASTM D2734, 2011 и ASTM D2584, 1994). Дополнително за да се види дистрибуцијата на пори за дел од композитните примероци направени се снимки со оптички микроскоп.

4.2.5.1 Определување на содржината на составните компоненти во композитните примероци (Determination of the content of the constituent components in the composite samples)

За определување на содржината на составните компоненти и теоретската густина на полимерните композитни плочи е користен претходно споменатиот стандард ASTM D3171 (ASTM D3171, 2015), поглавје 4.1.3.1.

Содржината на пори (%) во композитните примероци е определена со примена на стандардите ASTM D792/ASTM D2734 /ASTM D2584 (ASTM D792, 2008; ASTM D2734, 2011 и ASTM D2584, 1994). За компаративна анализа и за да се види дистрибуцијата на порите во композитните примероци за дел од примероците направени се микроснимки со помош на оптички микроскоп.

Содржината на пори (процентот на пори) во композитниот материјал може значително да влијае на некои од неговите механички својства. Висока содржина на пори вообичаено значи помала отпорност на замор, поголема подложност на пенетрација на влага и атмосферски влијанија и зголемена варијација на јачината. Познавањето на содржината на пори во композитниот материјал е пожелно бидејќи е значаен показател за квалитетот на композитниот материјал.

Содржина на пори во проценти (%) на композитните примероци е пресметана со користење на равенката 4.9.

$$V = 100\ (T_d - M_d)T_d \qquad [4.9]$$

каде што:

V - содржина на пори, %

T_d - теоретска густина на композитниот примерок, g/cm^3,

M_d - измерена густина на композитниот примерок, g/cm^3.

4.2.5.2 Јачина и модул на еластичност при свиткување (Flexural strength and modulus of elasticity in flexure)

Испитувањето на свиткување се користи за определување на цврстината и промената на формата при оптоварувања на свиткување на композитниот материјал. Димензиите на испитуваните епрувети, како и нивната изработка зависи од видот на материјалот кој се испитува. При испитување на композитен материјал, стандардните пропишани димензии на испитуваните епрувети според EN ISO 14125 (b x l x дебелината на епруветата, каде b е ширина на епруветата, l е должина на истата), се 15 x 60 x дебелината на епруветата (mm). Од секоја композитна плоча се сечат по 5 епрувети (60 x 15 mm) во надолжна насока (MD) и по 5 епрувети (60 x 15 mm) во напречна насока (CD) со помош на дијамантска пила. Изгледот на епруветите за испитување на јачината на свиткување е илустриран на Слика 4.14.

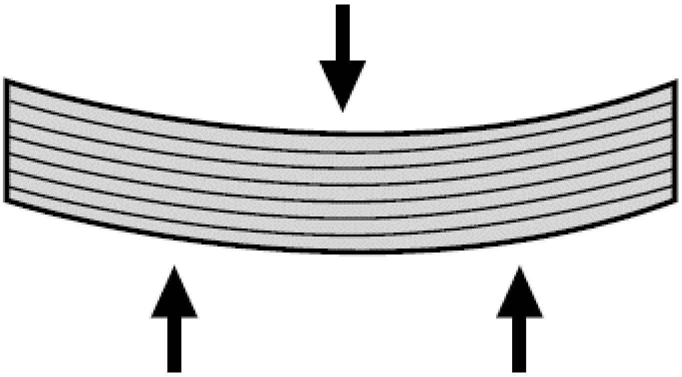
Со цел да се определат јачината и модулот на свиткување, епруветите се изложуваат под дејство на сила. За оваа цел постојат две методи и тоа: метода со 3 точки на свиткување и метода со 4 точки на свиткување. Испитувањата во рамките на оваа докторска дисертација се работени според методот со 3 точки на свиткување.

Слика 4. 14 Стандардни епрувети за испитување на јачина на свиткување
Figure 4. 14 Standard test tubes for examination of flexural strength

За испитување на јачината на свиткување на композитните структури се користеше универзална машина за тестирање, „SCHENCK- Hidrauls PSB“ со максимално сила од 250 kN и брзина на тестирање од 5 mm/min (сл. 4. 15).

Слика 4. 15 Испитување на јачината на свиткување со метода со три точки на свиткување
Figure 4. 15 Flexural strength test using a three-point flexural method

Методот со 3 точки на свиткување екстензивно се користи за механичка карактеризација поради едноставноста на подготовка и тестирање на примерокот. Ова е интересен начин за истовремено изложување на тест примерокот на сили на истегнување, компресија и смолкнување со цел да се провери неговиот структурен интегритет. Кога примерокот е оптоварен како на Слика 4. 16, горната површина на ламинатот е изложена на компресија, долната површина е изложена на истегнување, додека во средишниот (централниот) дел на ламинатот настанува смолкнување.



Слика 4. 16 Тест примерок изложен на свиткување
Figure 4. 16 Test sample exposed to bending

При испитување на епруветите со правоаголен попречен пресек, напрегањето при свиткување е пресметано во согласност со равенката 4.10:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad [4.10]$$

каде што:

σ_f – напрегање на свиткување изразено во MPa;

F – сила на оптоварување во N;

L – растојание, должина каде примерокот се потпира (т.е. меѓу потпорите) во mm;

b – ширина на испитуваната епрувета во mm и

h – дебелина на испитуваната епрувета во mm.

Модулот на еластичност при испитување на свиткување ја опишува зависноста помеѓу напрегањето, σ и деформацијата, Ɛ. Модулот на еластичност при свиткување (E_f) и деформацијата при свиткување (ε_f) на композитните примероци се пресметани со примена на следниве равенки (4.11 и 4.12):

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3}\left(\frac{\Delta F}{\Delta s}\right) \qquad [4.11]$$

$$\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2} \qquad [4.12]$$

каде што:

E_f – модул на еластичниот при свиткување во MPa;

Δs – разлика во средната точка (дефлексија) помеѓу s`` и s`, во mm;

ΔF – разлика помеѓу силата F`` и силата F` при s`` и s`, во N;

ε_f – деформација при свиткување во % и

s – максимално одклонување од центарот на плочата при испитување во mm.

5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА (RESULTS AND DISCUSSION)

5.1 Определување на физичко - механичките својства на полимерните композитни цевки (Determination of physical and mechanical properties of polymer composite pipes)

5.1.1 Определување на содржината на составните компоненти во композитните примероци (Determination of the content of the constituent components in the composite samples)

Содржината на конституентите во композитните примероци е определена според стандардот ASTM D3171 (ASTM D3171, 2015). Во Табела 5. 1 се претставени резултатите од испитаните масени и волуменски удели на зајакнувачката компонента (Е- стаклените влакна) и на полимерната матрица (епоксидна смола) како и пресметаната теоретска густина за добиените композитни примероци. Индивидуалните густини на конституентите се земани како готови вредности од производителот и при пресметките земена е густина на стаклените влакна од 2,56 g/cm^3 и густина на епоксидната смола од 1,15 g/cm^3.

Содржината на конституентите во композитните примероци значително влијае на крајните механички својства на композитниот материјал. Полимерната матрица во композитот сочинува обично 30 - 40 %, додека зајакнувачката компонента е присутна со 60 - 70 %. Општо земено, волуменски удел на влакна од 60 % се смета за соодветен при примена на технологијата на намотување на филаменти, бидејќи овозможува адекватна количина на зајакнувачки влакна да бидат инкорпорирани во композитната структура со доволна количина на смола за целосна импрегнација. На пример, Mertiny & Ellyin ја покажале важноста на волуменскиот удел на Е - стаклените влакна преку испитување на влијанието на затегнатоста на влакната врз физичко - механичките својства на композитни цевки зајакнати со стаклени влакна (Mertiny & Ellyin, 2002). Зголемувањето на волуменскиот удел резултирало со значајно зголемување на механичките својства на композитите кои се детерминирани од зајакнувачката компонента.

Табела 5. 1 Масени и волуменски удели на конституентите и теоретска густина на композитните примероци
Table 5. 1 Mass and volume content of the constituents and theoretical density of the composite samples

Ознака на пример./ Sample designation		Маса пред жарење/ Weight before burning, g	Маса по жарење/ Weight after burning, g	Масен удел на влакна/ Mass fiber content, %	Масен удел на смола/ Mass resin content, %	Волум. удел на влакна/ Volume fiber content, %	Волум. удел на смола/ Volume ratio of resin,%	Теоретска густина/ Theoretical density
1	**1-1**	2,145	1,6930	78,9277	21,0723	62,7225	37,2775	2,0344
	1-2	1,9823	1,5630	78,8478	21,1522	62,6102	37,3898	2,0328
	1-3	2,157	1,7040	78,9986	21,0014	62,8222	37,1778	2,0358
	1-4	2,226	1,6978	76,2713	23,7287	59,0823	40,9177	1,9831
	1-5	1,996	1,5687	78,5922	21,4078	62,2523	37,7477	2,0278
	1-6	2,126	1,6260	76,4817	23,5183	59,3638	40,6362	1,9870
	1-7	1,9734	1,5546	78,7777	21,2223	62,5119	37,4881	2,0314
Просечна вредност/ Average				**78,1282**	**21,8718**	**61,6236**	**38,3764**	**2,0189**
2	**2-1**	2,7913	2,0567	73,6825	26,3175	55,7072	44,2928	1,9365
	2-2	2,5432	1,8753	73,7378	26,2622	55,7776	44,2224	1,9407
	2-3	3,0222	2,2356	73,9726	26,0274	56,0773	43,9227	1,9302
	2-4	2,639	1,9367	73,3876	26,6124	55,3330	44,6670	1,9447
	2-5	2,685	1,9921	74,1937	25,8063	56,3607	43,6393	1,9297
	2-6	3,057	2,2426	73,3595	26,6405	55,2974	44,7026	1,9498
	2-7	2,9513	2,1980	74,4757	25,5243	56,7239	43,2761	1,9365
Просечна вредност/ Average				**73,8299**	**26,1701**	**55,8967**	**44,1033**	**1,9381**
3	3-1	2,653	2,0129	75,8726	24,1274	58,5517	41,4483	1,9756
	3-2	2,5876	1,9536	75,4985	24,5015	58,0575	41,9425	1,9686
	3-3	2,5639	1,9470	75,9390	24,0610	58,6398	41,3602	1,9768
	3-4	2,738	2,0320	74,2148	25,7852	56,3878	43,6122	1,9451
	3-5	2,5963	1,9775	76,1661	23,8339	58,9418	41,0582	1,9811
	3-6	2,7983	2,0940	74,8311	25,1689	57,1845	42,8155	1,9563
	3-7	2,4968	1,9031	76,2216	23,7784	59,0158	40,9842	1,9821
Просечна вредност/ Average				**75,5348**	**24,4652**	**58,1113**	**41,8887**	**1,9694**

Врз основа на резултатите претставени во Табела 5.1 може да се констатира дека масениот и волуменскиот сооднос помеѓу зајакнувачката компонента и полимерна матрица во испитуваните композитни примероци е добар, односно постои добра атхезија помеѓу матрицата и зајакнувачот. Волуменскиот удел на влакната во испитуваните композитни примероци е од (56 - 62 %) што значи дека произведените цевчести структури ќе се одликуваат со добри механички карактеристики.

5.1.2 Определување на јачината на истегнување на композитните прстенести примероци (Determination of hoop tensile strength of the composite pipe samples)

Со цел да се покаже влијанието на линеарните текстилни структури (зајакнувачката компонента) врз физичко – механичките својства на текстилните композитни материјали се изработени композитни цевчести структури со различен дизајн т.е. со различни агли на намотување на влакната. Се користеа три различни агли на намотување на стаклените влакна: 10º, 45º и 90º. Со помош на сплит – диск тест метода (стандардот ASTM D2290) е тестирана јачината на истегнување на добиените композитните цевки. Во Табела 5. 2 дадени се ознаките на произведените композитни цевки и основните карактеристики на прстенестите тест примероци (ширина, дебелина и агол на намотување).

Резултатите добиени од извршените тестирање за крајната јачина на истегнување на прстенестите тест примероци според сплит – диск методата се дадени во Табела 5. 3. Од секоја група се тестираа по седум примероци. Крајната јачина на истегнување на композитните примероци беше определена со користење на равенството 4.6. Дополнително средната вредност за крајната јачина на истегнување беше пресметана за секоја група и врз основа на добиените резултати беше детерминирано генералното однесување на тестираните примероци.

На Слика 5. 1 и Слика 5. 2 се претставени добиените криви сила – поместување за некои од тестираните примероци од серија 1 и 2. Овие примероци беа тестирани на универзална машина за тестирање Zwick/Roell Z050 со максимална сила од 50 KN и брзина на тестирање од 0,3 inch/min.

На Слика 5. 3 се претставени кривите напрегање - деформација за дел од примероците од серија 3 испитувани на универзална машина за тестирање Zwick/ Roell Z400 со максимална сила од 400 MPa и брзина на тестирање од 0,3 inch/min. Овие композитни примероци беа тестирани на машина за испитување со поголема сила поради нивната поголема јачина на истегнување во однос на примероците од серија 1 и 2.

Табела 5. 2 Основни карактеристики на прстенестите тест примероци
Table 5. 2 Basic characteristics of the ring test specimens

Ознака на примероците/ Sample designation		**Ширина/ Width, (mm)**	**Дебелина/ Thickness, (mm)**	**Агол на намотување/ Winding angle, (°)**
Примерок 1/ Sample 1	**1-1**	14,12	3,27	10°
	1-2	14,20	3,27	
	1-3	14,19	3,27	
	1-4	14,17	3,20	
	1-5	14,17	3,24	
	1-6	14,00	2,95	
	1-7	14,00	2,95	
Примерок 2/ Sample 2	**2-1**	14,05	3,18	45°
	2-2	14,01	3,00	
	2-3	14,00	3,08	
	2-4	14,07	3,12	
	2-5	14,05	3,15	
	2-6	14,02	3,00	
	2-7	14,08	3,08	
Примерок 3/ Sample 3	**3-1**	14,07	3,20	90°
	3-2	14,01	3,19	
	3-3	13,99	3,20	
	3-4	14,14	3,20	
	3-5	14,05	3,17	
	3-6	14,15	3,65	
	3-7	14,14	3,65	

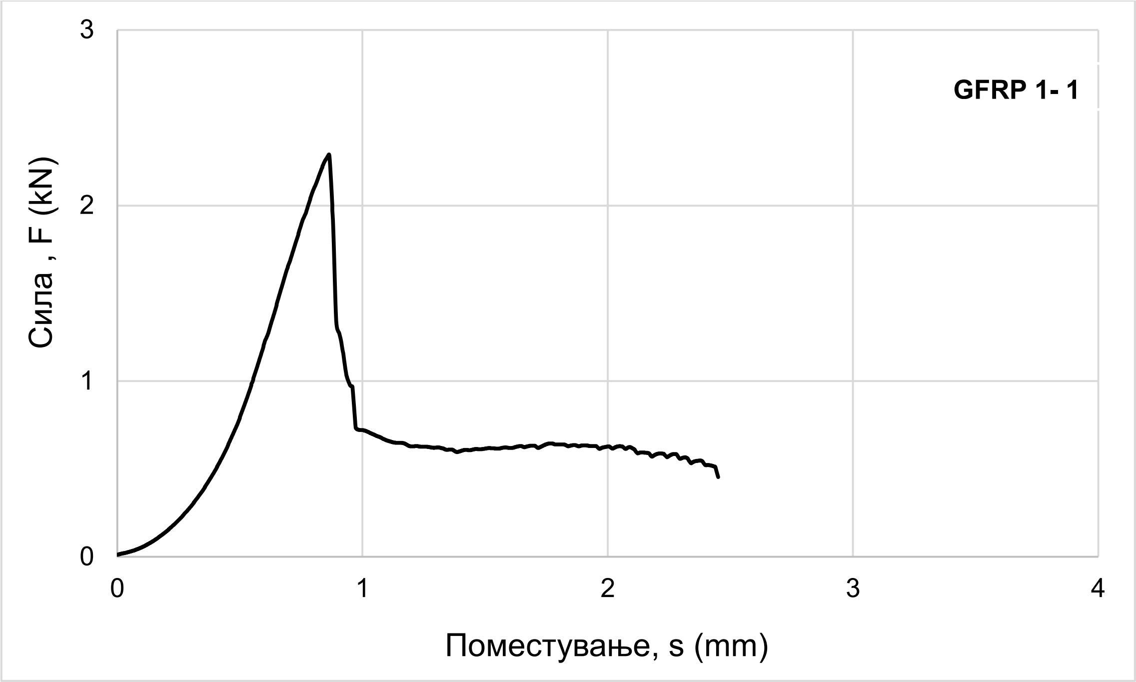
Табела 5. 3 Резултати за крајна јачина на истегнување од сплит - диск тестовите
Table 5. 3 Hoop tensile strength results of split-disk tests

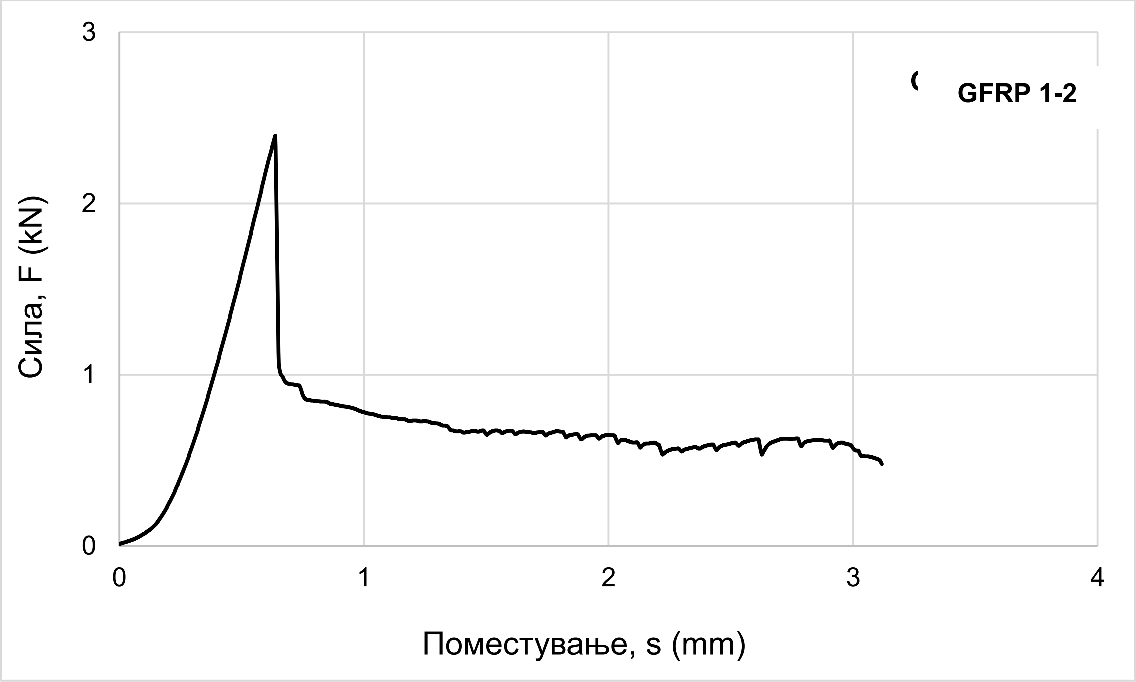
Ознака на примероци/ Sample Designation		**Ширина/ Width, b (mm)**	**Дебелина/ Thickness, d (mm)**	**Површина/ Area, A (mm)^2**	**Јачина на кинење/ Tensile strength, F (kN)**	**Крајна јачина на истегнување/ Ultimate hoop tensile strength s (MPa)**
Примерок 1/ Sample 1	**1-1**	14,12	3,27	46,17	2,29	24,798
	1-2	14,20	3,27	46,43	2,40	25,843
	1-3	14,19	3,27	46,40	2,25	24,245
	1-4	14,17	3,20	45,34	1,97	21,723
	1-5	14,17	3,24	45,91	1,95	21,237
	1-6	14,00	2,95	41,30	1,39	16,828
	1-7	14,00	2,95	41,30	1,43	17,312
				Просечна вредност/ Average	**1,954**	**21,712**
Примерок 2/ Sample 2	**2-1**	14,05	3,18	44,68	25,14	281,340
	2-2	14,01	3,00	42,03	24,25	288,484
	2-3	14,00	3,08	43,12	25,52	295,918
	2-4	14,07	3,12	43,90	25,04	285,204
	2-5	14,05	3,15	44,26	24,44	276,111
	2-6	14,02	3,00	42,06	23,98	285,069
	2-7	14,08	3,08	43,37	24,50	282,477
				Просечна вредност/ Average	**24,696**	**284,943**
Примерок 3/ Sample 3	**3-1**	14,07	3,20	45,02	80,60	895,078
	3-2	14,01	3,19	44,69	68,50	766,358
	3-3	13,99	3,2	44,77	65,70	733,783
	3-4	14,14	3,20	45,25	61,50	679,588
	3-5	14,05	3,17	44,54	77,20	866,666
	3-6	14,15	3,65	51,65	72,30	699,937
	3-7	14,14	3,65	51,61	77,60	751,778
				Просечна вредност/ Average	**71,914**	**770,455**

Врз основа на резултатите претставени во Табела 5. 3 може да се забележи дека примероците добиени од композитните цевчести структури со агол на намотување од 90° имаат значително поголеми вредности за максималната сила на истегнување до кинење (770,455 MPa) во однос на примероците добиени од композитните структури со најмал агол на намотување од 10° (21,712 MPa).

Од друга страна пак, тест примероците од композитните цевки добиени со агол на намотување од 45° на зајакнувачката компонента покажаа за тринаесет пати повисока јачина на истегнување во однос на примероците намотани со агол од 10°, но за околу 37 % пониски вредности за крајната јачина на истегнување во однос на примероците намотани со агол од 90°. Кај композитните цевки со најголем агол на намотување (90°), силата на истегнување дејствува лонгитудинално во правец на стаклените влакна, па поради тоа овие примероци имаат највисоки вредности за крајната јачина на кинење. Со зголемување на аголот на намотување на влакната, се зголемува јачината на композитната структура во лонгитудинална насока, додека јачината во аксијална насока се намалува.

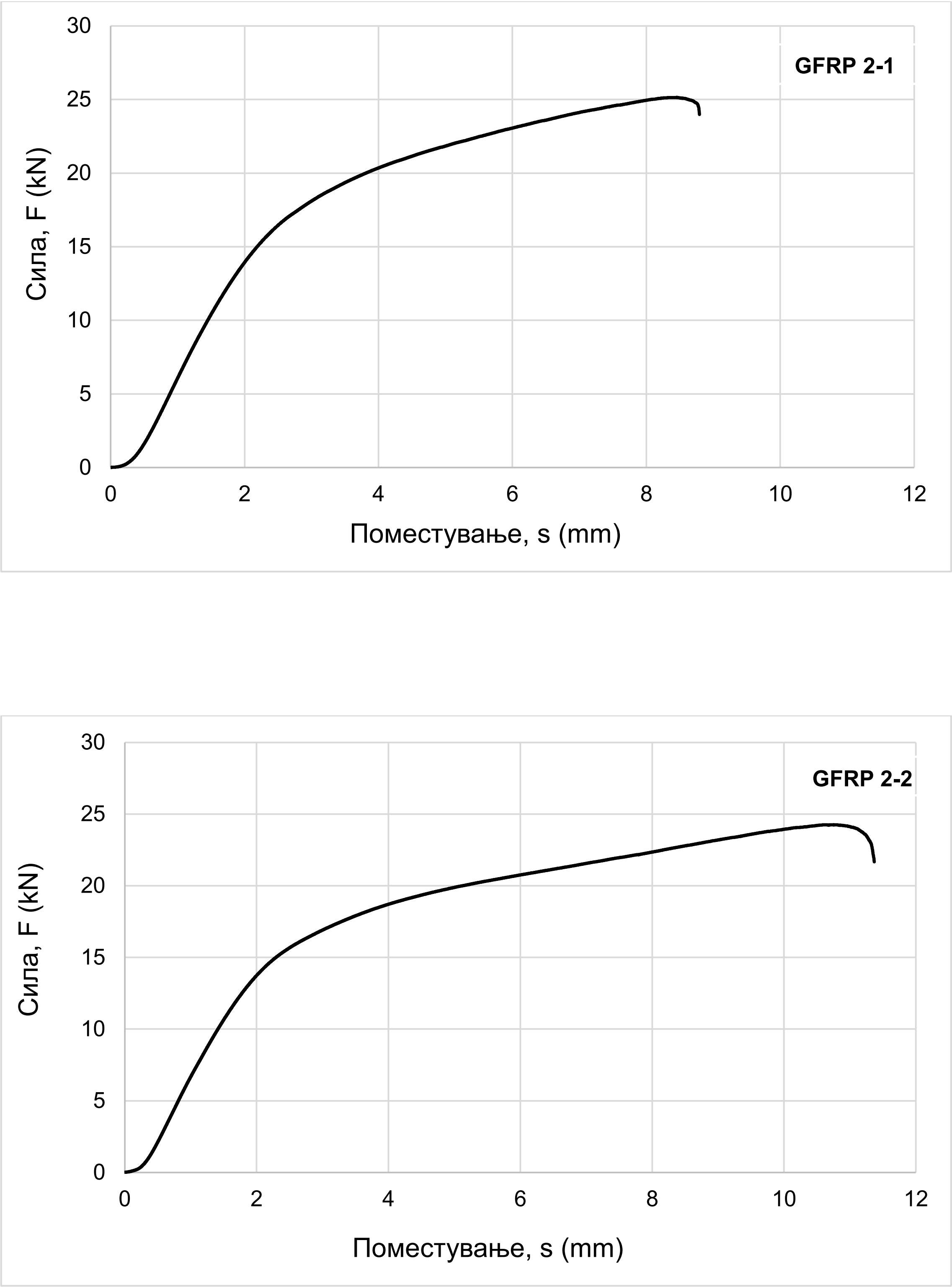
Примероците со агол на намотување од 45°, се одликуваат со оптимална отпорност во лонгитудинална и аксијална насока, како резултат на спиралното намотување на влакната. Кај овој вид на композитна структура истовремено се истегнуваат и стаклените влакна и матрицата и крајната јачина на истегнување е детерминирана од јачините на двете составни конституенти: зајакнувачката компонента и матрицата.





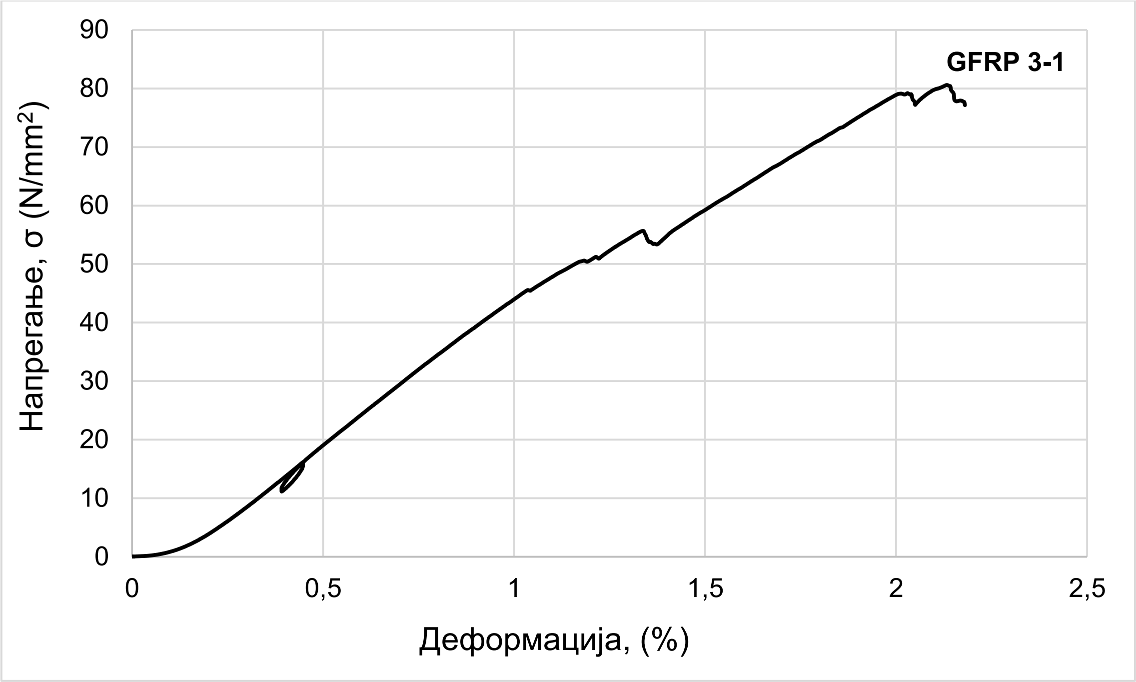
Слика 5. 1 Криви сила – поместување за прстенестите примероци серија 1-1 и 1-2

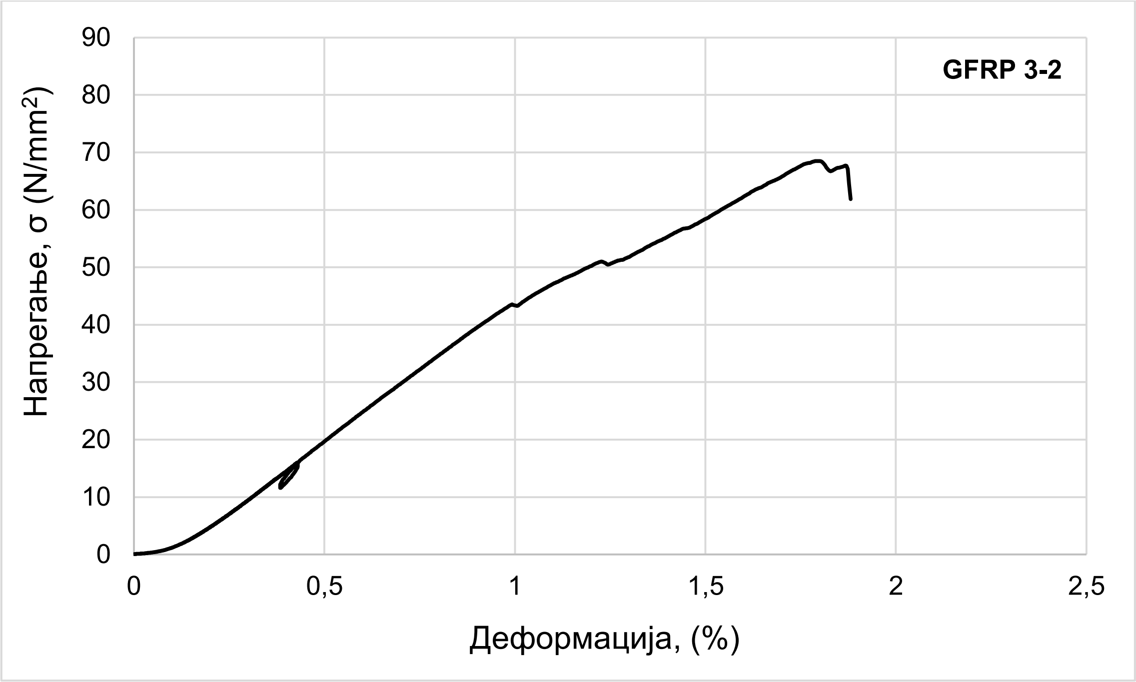
Figure 5. 1 Force and displacement graphs of split disk samples 1-1 and 1-2



Слика 5. 2 Криви сила – поместување за прстенестите примероци серија 2-1 и 2-2

Figure 5. 2 Force and displacement graphs of split disk samples 2-1 and 2-2



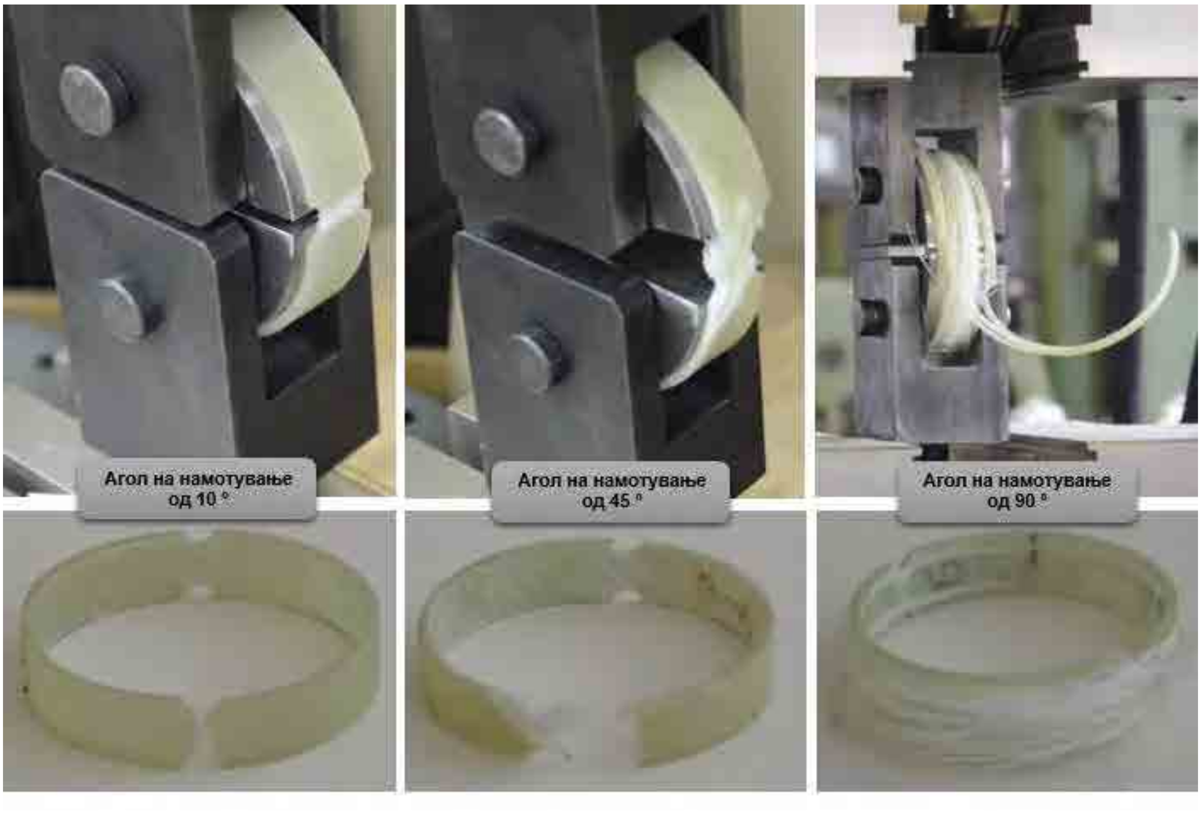


Слика 5. 3 Криви напрегање – деформација за прстенестите примероци 3-1 и 3-2

Figure 5. 3 Stress and deformation graphs of split disk samples 3-1 and 3-2

Слики од деструкцијата на површината на композитните прстенести примероци со различен агол на намотување 10°, 45° и 90° после тестирање се прикажани на Слика 5. 4. Може да се забележи дека деструкција на површината кај примероците со различен агол на намотување е различна.

Кај примероците со агол на намотување од 10° силата на истегнување дејствува нормално на стаклените влакна (зајакнувачката компонента) што резултира со најмала отпорност на силите на истегнување. Всушност, тоа е отпорност која се должи пред се на јачината на епоксидниот смолен систем затоа што влакната во овие примероци се во правец каде што нивната ефикасност воопшто не е искористена. Кривите сила – поместување (сл. 5.1) кај овие примероци имаат мал линеарен дел со мал наклон кој продолжува во билинеарен облик се до пукање на примерокот.



Слика 5. 4 Приказ на деструкцијата на композитните примероци со различен агол на намотување по испитување на јачината на истегнување
Figure 5. 4 Failure of samples with different angle of winding, after examining the tensile strength

Од друга страна, кај примероците со агол на намотување од 90° стаклените влакна се во иста насока со силата која дејствува на структурата и затоа таа конфигурација покажува највисока јачина на истегнување. Од кривите напрегање – деформација (сл. 5. 3) може да се види дека обликот на кривите е приближно линеарен при високи вредности за силата на истегнување, се до пукање и целосна деструкција на прстенестиот примерок. На тој начин, со постојано зголемување на јачината на истегнување во правецот на филаментите, доаѓа до постепено пукање на слоевите. Распаѓањето на примероците беше проследено со звук на кршење т.е. пукање. Кај овие примероци е забележана деструкција на влакната, како и на интерфејсот помеѓу влакната и смолниот систем. Во процесот на намотување на филаменти, намотувањето на филаментите е во еден правец и филаментите не се испреплетуваат меѓу себе. Вака намотаните цевки се лесно кршливи и помалку отпорни на јачина на истегнување. Ако постојат испреплетени филаменти, тие ќе се однесуваат како точки во кој ќе се стопира процесот на пукање т.е. уништување на примерокот.

Деструкцијата на примероците со агол на намотување од 45° е различна во споредба со претходните, односно не настанува комплетно оштетување на композитната структура и таа може да издржи понатамошни оптоварување при помали сили на истегнување кои доведуваат до поголемо поместување на структурата и на крај до пукање на прстенестиот примерок. Кај кривите сила – поместување (сл. 5. 2) се забележува одреден линеарен дел се до пукање на некои слоеви од композитната структура и овие тест примероци покажаа најголема еластичност.

Врз основа на добиените и анализирани резултати може да се констатира дека аголот на намотување на зајакнувачката компонента има значајно влијание врз механичките својства на композитните цевчести структури. Поголеми агли на намотување на стаклените влакна обезбедуваат добивање на композитни цевки со поголема јачина на истегнување и обратно. Ова овозможува дизајнирање на композитни цевчести структури со максимални перформанси преку селекција на аголот на намотување на влакната и оптимизирање на отпорноста на прстенот во потребната насока.

5.1.3 Скениниг електронска микроскопија (СЕМ) на тестираните композитни прстени (Scanning electron microscopy (SEM) of the tested composite rings)

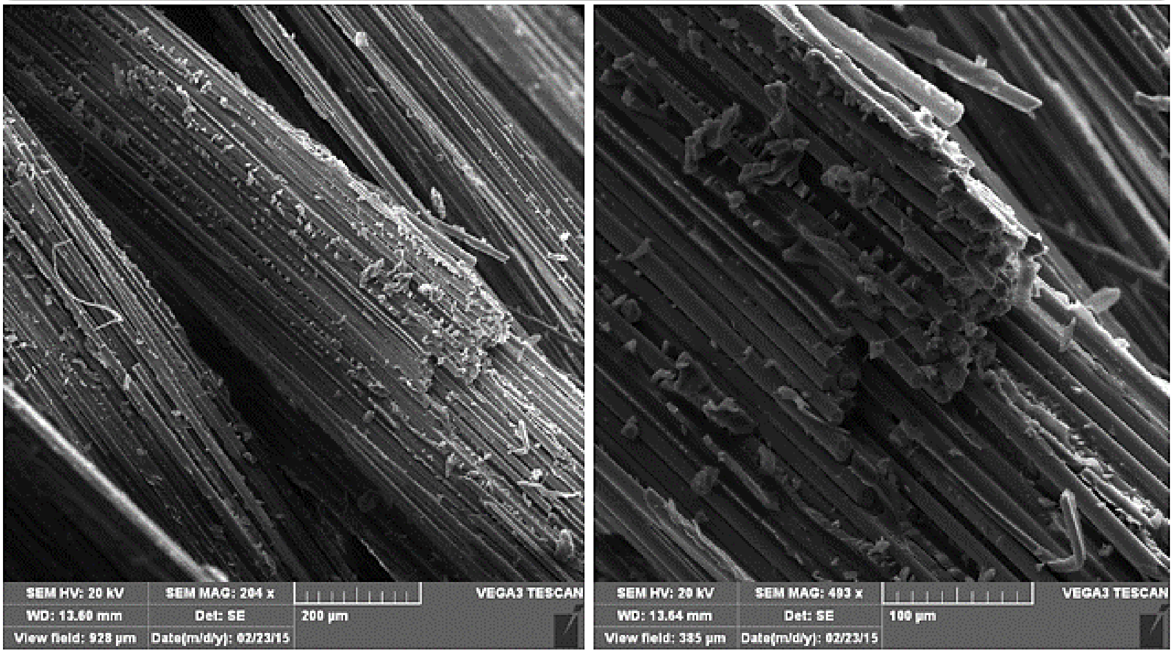
Карактеризација на површината на добиените композитни цевки по фрактура со помош на скенинг електронската микроскопија (СЕМ) е направена со цел да се види атхезијата помеѓу стаклените влакна и матрицата во текот на процесот на намотување односно дали влакната се добро импрегнирани со смола. Направени се снимки со различни зголемувања на тест примероците после фактура во надолжен и напречен правец. На Слика 5. 5 се претставени добиените СЕМ микрофотографии.

Врз основа на СЕМ анализите, беше забележано дека постои добра поврзаност помеѓу влакната и смолата, а на местата на прекин од тестирањето беше забележана одредена деструкција на влакната и на матрицата.

Кај СЕМ микрофотографиите за примероците со агол на намотување од 10° (сл. 5. 5 а) може да се забележи многу мало оштетување на Е - стаклените влакна затоа што при истегнувањето, прекинот настанува, воглавно, како резултат на пукање на епоксидниот смолен систем (матрицата). Во овој случај ефикасноста на стаклените влакна воопшто не е искористена бидејќи силите на истегнување дејствуваат нормално на влакната.

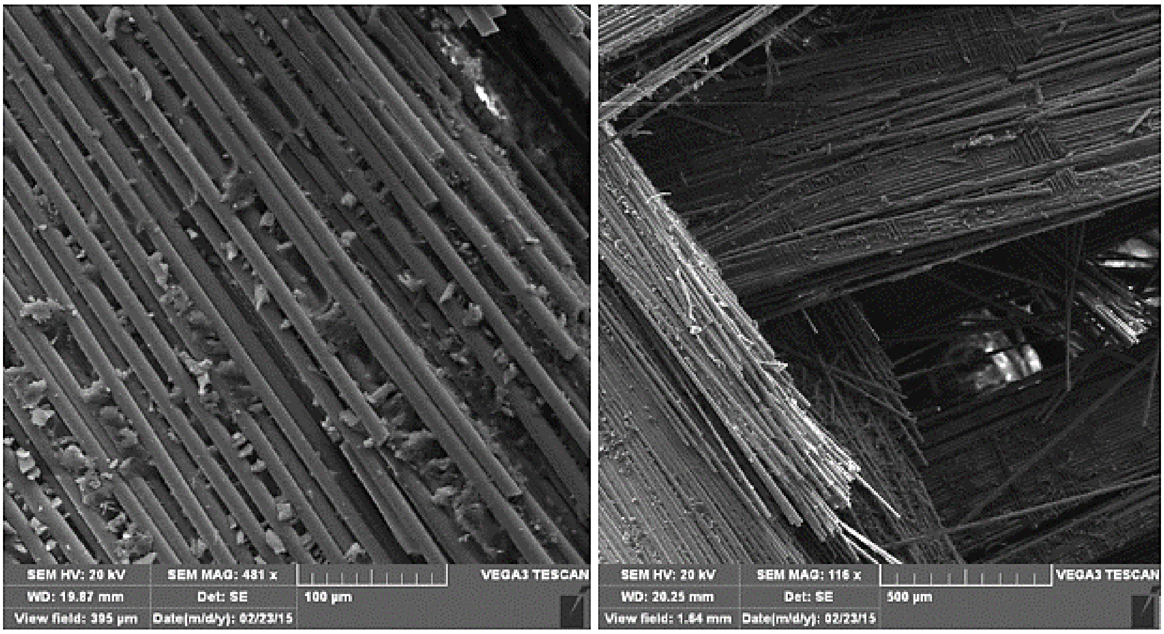
Кај СЕМ снимките за примероците со агол на намотување од 45 °(сл. 5. 5 б) може да се забележи дека постои добра поврзаност на влакната со матрицата и при крајното истегнување, доаѓа до прекин и на влакната и на матрицата. Исто така, при прекинот се забележува и нивно одредено раслојување (деламинација). Од СЕМ микрофотографиите за композитните примероци со агол на намотување од 90° (сл. 5. 5 в) очигледна е континуираноста на влакната како и атхезијата помеѓу матрицата и влакната. Во овој случај, силите на истегнување дејствуваат во насока на влакната и прекинот настанува како резултат на кинење на влакната.

CEM снимки за примероци со агол на намотување од 10°

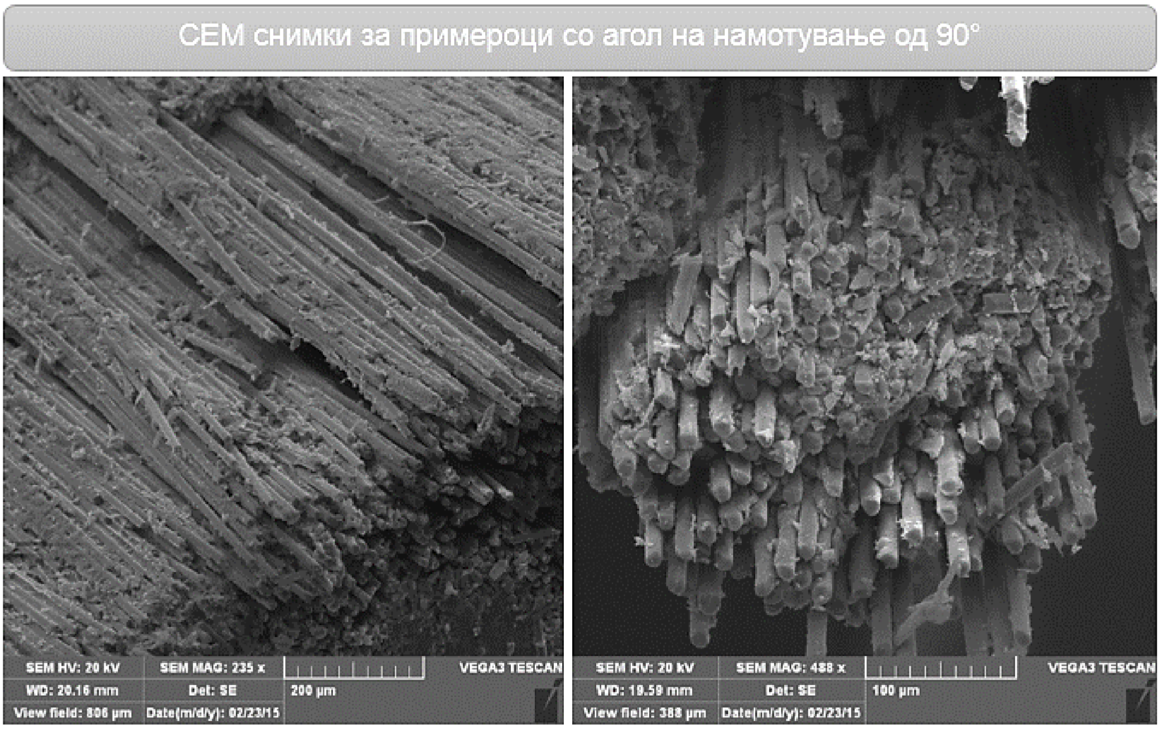


а)

CEM снимки за примероци со агол на намотување од 45°



б)



в)

Слика 5. 5 СЕМ микрофотографии по фрактура на композитните прстенести примероци со агол на намотување од а) 10°, б) 45° и в) 90°
Figure 5. 5 SEM microphotographs after fracture of composite ring specimens with different winding angle a) 10°, b) 45° и v) 90°

5.2 Примена на дводимензионални текстилни структури како зајакнувачка компонента во композитните материјали (Application of two - dimensional textile structures as reinforcement in composite materials)

5.2.1 Структурни карактеристики на применетите дводимензионални текстилни структури (Structural characteristics of applied two - dimensional textile structures)

Структурните карактеристики на применетите Е - стаклени ткаенини се определени со примена на стандардни методи и истите се прикажани во Табела 5.4. Во Табела 5. 5 се дадени димензиите и измерената маса на тест примероците како и добиените вредности за површинската маса за секоја од ткаенините. Резултатите претставуваат средна вредност од 5 мерења на прецизна електронска вага при стандардни услови.

Табела 5. 4 Структурни карактеристики на Е - стаклените ткаенини
Table 5. 4 Structural characteristics of E- glass fabrics

Карактеристика/ Characteristic		**Примерок 1/ Sample 1**	**Примерок 2/ Sample 2**	**Примерок 3/ Sample 3**
Тип на преплет/ Type of weave		Платно/ Plain	Кепер 2/2/ Twill 2/2	Панама 2/2/ Basket 2/2
Дебелина （mm)// Thickness （mm）		0,3	0,32 ± 0,05	0,31
Ширина (cm)/ Width (cm)		2000	92	100
Број на предива/ Count (ends/cm)	**Основа/ Warp**	8±1	8±1	7±1
	Јаток/ Weft	6±1	7±1	6±1

Врз основа на вредностите за структурните карактеристики на Е - стаклените ткаенини прикажани во Табела 5.4 може да се забележи дека сите три типа на користени Е - стаклени ткаенини имаат поголема густина по основа, т.е. поголем број на основини жици на 1 cm. Платно и кепер стаклената ткаенината имаат иста густина по основа. Е - стаклената ткаенина во панама преплет (примерок 3) се одликува со помала густина по основа во однос на останатите анализирани ткаенини (примерок 1 и примерок 2).

Табела 5. 5 Површинска маса на Е- стаклените ткаенини
Table 5. 5 Surface mass of E- glass fabrics

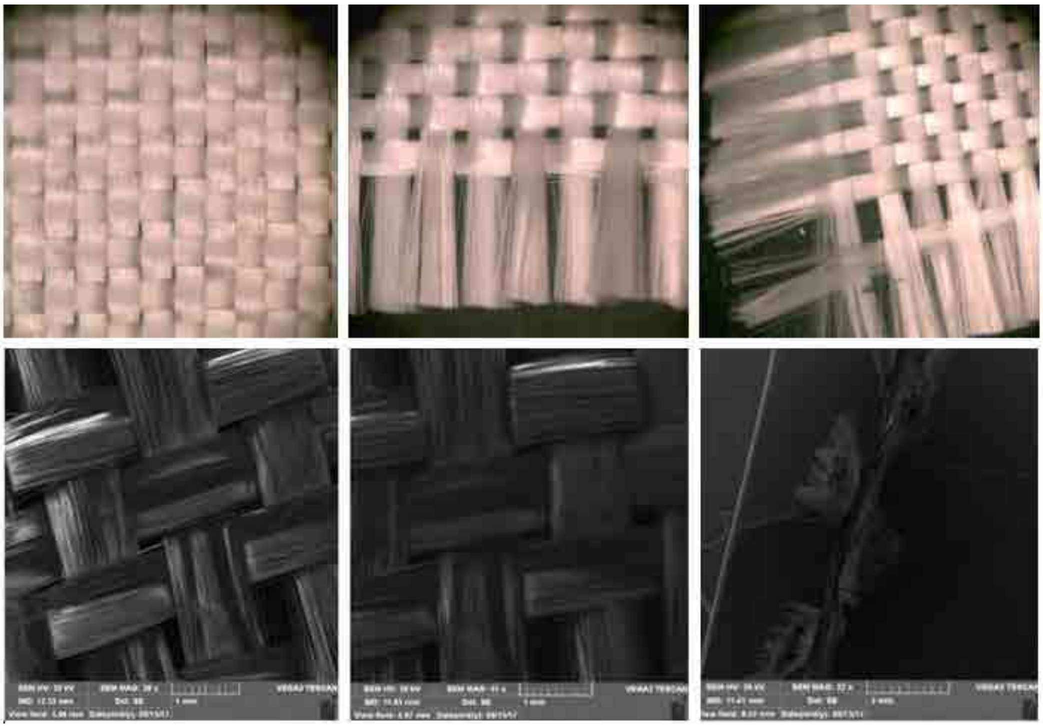
Број на примерок/ Sample number		Ширина/ Width, a (m)	Должина/ Length, b, (m)	Плоштина/ Surface P, (m^2)	Измерена тежина/ Measured weight, (g)	Површинска маса/ Surface mass, (g/m^2)	Теоретска повр. маса/ Theoretical surface mass, (g/m^2)
Примерок 1/ Sample 1	**1-1**	0,102	0,103	0,011	2,901	276,128	300±20
	1-2	0,101	0,105	0,011	2,971	280,151	
	1-3	0,100	0,102	0,010	2,905	284,804	
	1-4	0,103	0,102	0,011	2,942	280,030	
	1-5	0,105	0,100	0,011	2,893	275,524	
Просечна вредност/Average					**2,9224**	**279,327**	
Примерок 2/ Sample 2	**2-1**	0,103	0,100	0,010	3,154	306,214	320±20
	2-2	0,105	0,104	0,011	3,234	296,154	
	2-3	0,104	0,100	0,010	3,015	289,904	
	2-4	0,100	0,105	0,011	3,204	305,143	
	2-5	0,102	0,100	0,010	3,078	301,765	
Просечна вредност/Average					**3,137**	**299,836**	
Примерок 3/ Sample 3	**3-1**	0,105	0,105	0,011	3,503	317,732	320±25
	3-2	0,100	0,104	0,010	3,371	324,135	
	3-3	0,104	0,102	0,011	3,416	322,021	
	3-4	0,101	0,102	0,010	3,319	322,170	
	3-5	0,101	0,101	0,010	3,437	336,928	
Просечна вредност/Average					**3,4092**	**324,597**	

Добиените експериментални резултати за површинската маса на применетите Е – стаклени ткаенини (таб. 5. 5) покажуваат дека сите три типа на анализирани ткаени структури имаат приближно иста површинска маса.

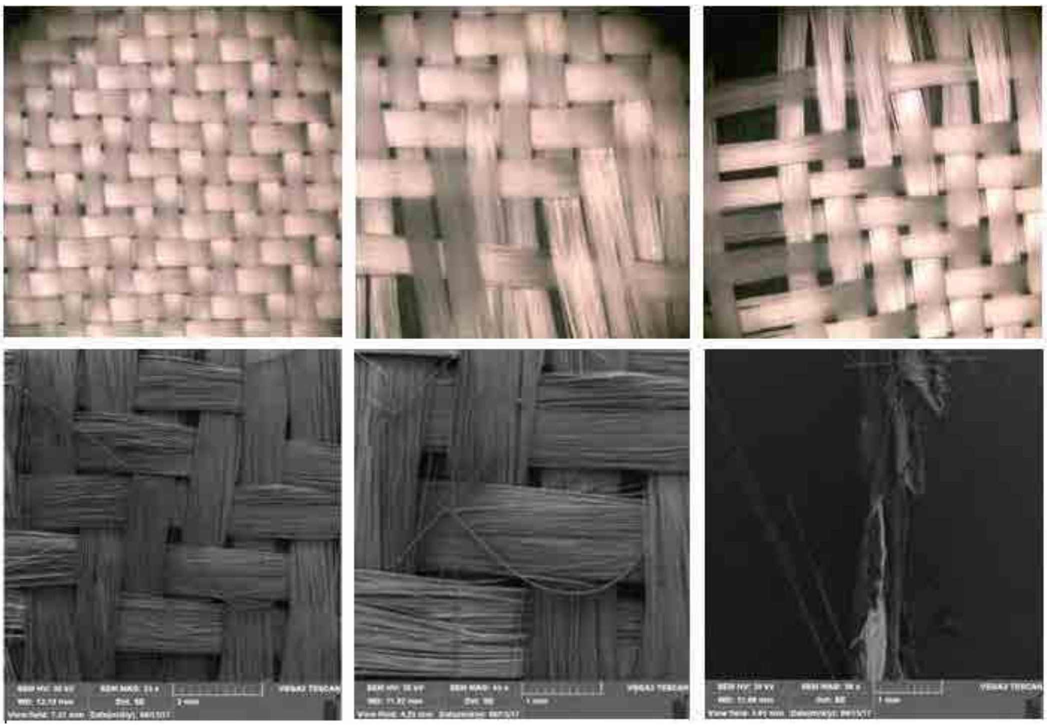
5.2.2 Карактеризација на структурата на применетите текстилни материјали со скенинг електронска микроскопија (Characterization of the structure of applied textile materials with scanning electron microscopy)

За определување на типот на преплет т.е. начинот на преплетување на основините и јаточните жици, беа направени микрофотографии на структурата на Е – стаклените ткаенини во надолжен и напречен правец со користење на два типа на микроскоп: бинокуларен микроскоп ZOOM 645 и скенирачки електронски микроскоп тип VEGA3 LMU од фирмата Tescan.

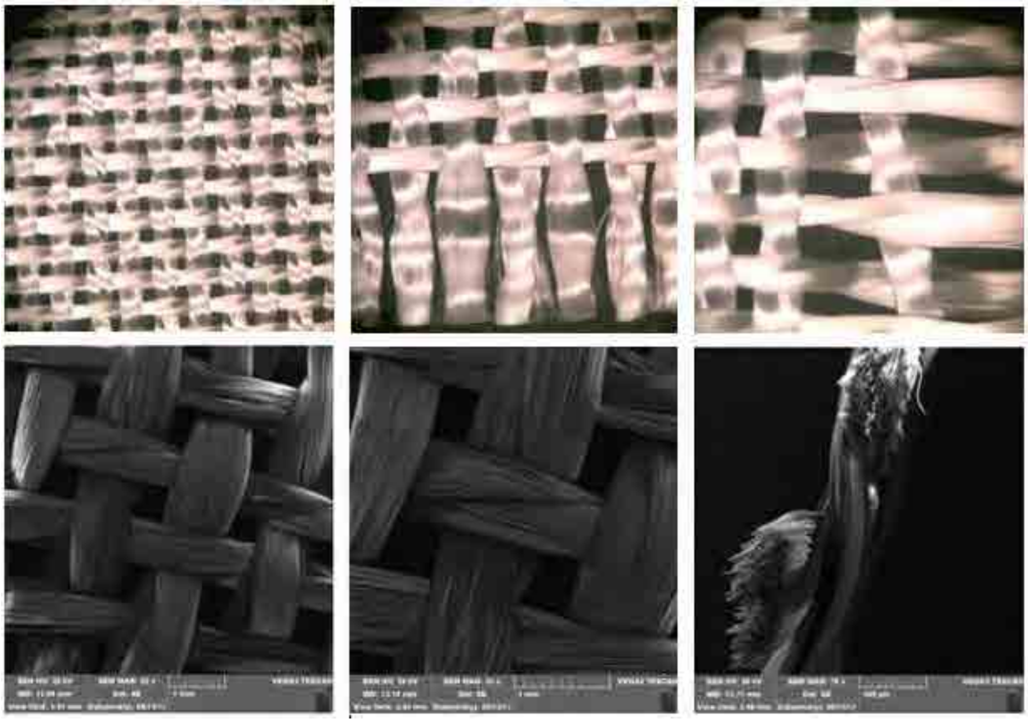
Добиените електронски микрофотографии со различни зголемувања на тест примероците 1, 2 и 3 се претставени на Слика 5. 6 соодветно. Од добиените микрофотографии на анализираните примероците од стаклена ткаенина, јасно се гледа разликата во начинот на преплетување на основините и јаточните жици. Кај првиот и вториот анализиран примерок се застапени два различни типови на преплет (платно и кепер 2/2 Z), кои спаѓаат во групата на основни типови на преплет, додека кај третиот примерок се среќава панама 2/2 преплетот (преплет изведен од платно преплет). Основните преплети се одликуваат со едноставни решенија кои истовремено овозможуваат формирање на ткаенини со доста цврста врска на основините и јаточните жици. Кај основните преплетки рапортите во двата правци се меѓусебно еднакви.



а)



б)



в)

Слика 5. 6 Микрофотографии од а) примерок 1, б) примерок 2 и в) примерок 3
Слика 5. 6 Microphotographs from a) sample 1, b) sample 2 and v) sample 3

Платно преплетот (сл. 5. 6 а) по својата конструкција е наједноставниот преплет со најцврсто меѓусебно поврзување на основините и јаточните жици. Стаклената ткаенина во платно преплет е симетрична и се одликува со максимална стабилност и цврстина. Во зависност од густината на ткаенината, натопувањето со смола и исфрлањето на воздух е прилично добро. Основен недостаток на овој тип на преплет му е слабата совитливост.

Кепер преплетот (сл. 5. 6 б) се одликува со карактеристично поврзување на основините и јаточните жици при што на лицето на ткаенината се формирани Z дијагонали. Овој тип на преплет се одликува со добра стабилност, ниска порозност и има релативно подобра драперливост во споредба со платно преплетот.

Панама 2/2 преплетот (сл. 5. 6 в) спаѓа во категоријата на изведени преплетки од платно преплетот. Кај овој тип на преплет јасно се видливи празните меѓупростори помеѓу основините и јаточните жици и оваа порозност ќе резултира со подобро натопување и инфилтрација на смолниот систем во самата ткаенина. Анализираната ткаенината во панама преплет има помала стабилност во однос на ткаенината во платно преплет.

5.2.3 Механички карактеристики на применетите дводимензионални текстилни структури (Mechanical characteristics of applied two - dimensional textile structures)

Јачината на истегнување на ткаенините не само што зависи од карактеристиките на предивата кои се користат за основа и јаток (нивната јачина, нивната финост, насоката на впредување, бројот на завои на единица должина итн.), туку исто така зависи и од структурните карактеристики на самата ткаенина (типот на преплет, густината по основа и јаток, условите на ткаење, итн.). Изборот на типот на преплет и промените во структурата на ткаенините е важно бидејќи има значајно влијание врз некои својства на ткаенините (порозноста, пропустливоста на воздух, дебелината, еластичноста, јачината и др.) како и врз перформансите на текстилните композитни материјали. Платно преплетот е наједноставниот и најчесто користен тип на преплет кај ткаенините кои се користат како зајакнувачка компонента кај текстилните композити.

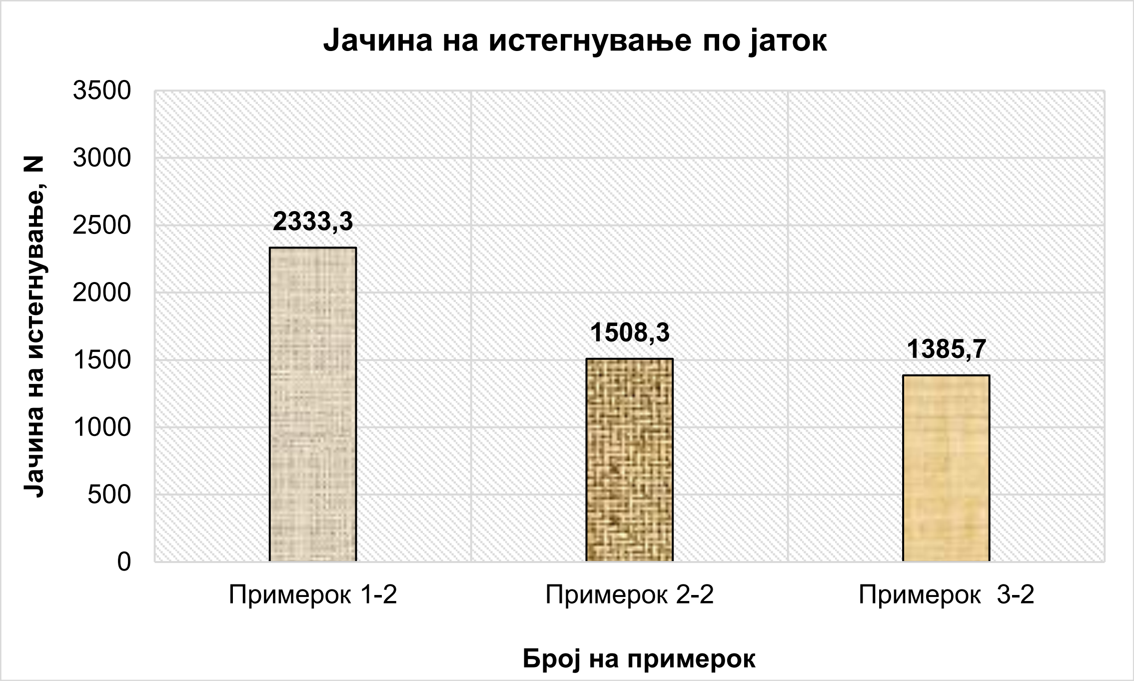
Табела 5. 6 Механички карактеристики на користените Е- стаклени ткаенини
Table 5. 6 Mechanical characteristics of the used E - glass fabrics

Број на примерок/ Sample number			Долж./ Length L (mm)	Ширина/ Width w (mm)	Бр. на предива основа/ јаток/ Count warp/ weft	Јачина на истегнув./ Tensile strength F (N)	Издолж./ Extension ΔL(mm)	Деф. на истегнув./ Tensile deformat. ε (%)
Примерок 1/ Sample 1	Основа / Warp	**1-1**	200	48	38	3327	8	4
		2-1	200	48	38	2910	10	5
		3-1	200	48	38	3000	8	4
		Просечна вредност /Average				**3079,0**	**9,3**	**4,7**
	Јаток/ Weft	**1-2**	200	48	31	2225	8	4
		2-2	200	48	31	2125	7	3,5
		3-2	200	48	31	2250	8	4
		Просечна вредност /Average				**2333,3**	**7,7**	**3,8**
Примерок 2/ Sample 2	Основа / Warp	**1-1**	200	48	37	2250	6	3
		2-1	200	48	37	2767	5	2,5
		3-1	200	48	37	2250	6	3
		Просечна вредност /Average				**2422,3**	**5,7**	**2,8**
	Јаток/ Weft	**1-2**	200	48	34	1475	6	3
		2-2	200	48	34	1525	6	3
		3-2	200	48	34	1525	6	3
		Просечна вредност /Average				**1508,3**	**6**	**3**
Примерок 3/ Sample 3	Основа / Warp	**1-1**	200	48	31	2095	5	2,5
		2-1	200	48	31	1700	7	3,5
		3-1	200	48	31	2150	4	2
		Просечна вредност /Average				**2008,3**	**5,3**	**2,7**
	Јаток/ Weftl	**1-1**	200	48	28	1505	10	5
		2-1	200	48	28	1052	10	5
		3-1	200	48	28	1600	10	5
		Просечна вредност /Average				**1385,7**	**10**	**5**

Во Табеле 5 .6 се прикажани добиените вредности за јачината на истегнување и издолжувањето при кинење на анализираните Е – стаклени ткаенини според стандардот ASTM D 5035 (D5035, 2003). Резултатите се средни вредности од три мерења на јачината на истегнување во правец на основата (надолжна

насока) и јатокот (напречна насока) и издолжувањето до кинење. На Слика 5. 7 е прикажана компаративна анализа на Е – стаклените ткаенини во однос на јачината на истегнување во правец на основата и јатокот.

(а)



(б)

Слика 5. 7 Јачина на истегнување на Е - стаклените ткаенини по а) основа и б) јаток

Figure 5. 7 Tensile Strength of E - glass fabrics according to a) warp and b) weft

Од добиените резултати (таб. 5. 6 и сл. 5. 7) може да се заклучи дека Е – стаклената ткаенина во платно преплет (примерок 1) има најголема отпорност на силите на кинење по основа и јаток (3079 N и 2333,3 N). Ова е и разбирливо бидејќи овој тип на преплет се одликува со најцврсто меѓусебно поврзување на основините и јаточните жици. Исто така, оваа ткаенина покажува и релативно високи вредности за деформацијата на истегнување (%) по основа и јаток.

Јачина на истегнување на кепер ткаенината во надолжна насока е за околу 20 % помала во однос на јачината на истегнување на платно ткаенината, но за околу 18 % поголема во однос на јачината на истегнување на панама ткаенината. Исто така, кепер ткаенината се одликува и со помала јачина на истегнување во напречна насока (за околу 35 %) во однос на јачината на истегнување на платно ткаенината.

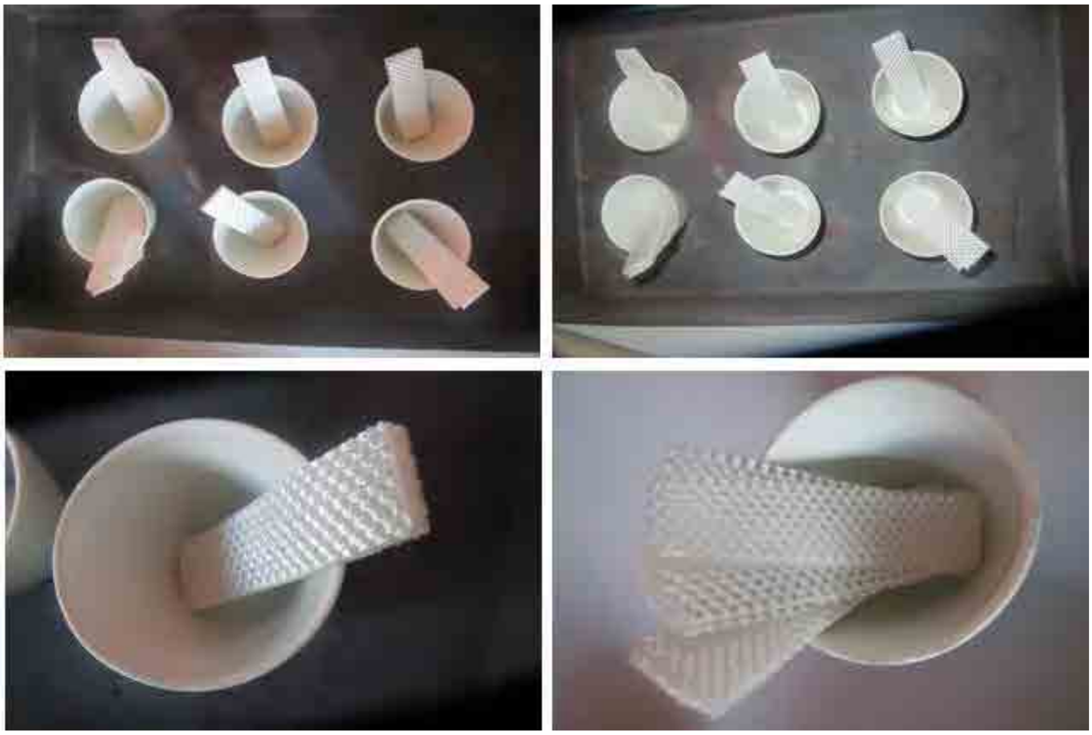
Најмала јачина на истегнување во надолжна и напречна насока (2008,3 N и 1385,7 N) има стаклената ткаенина во панама преплет (примерок 3). Малата јачина на оваа ткаенина е резултат на самата структура на ткаенината во која јасно се видливи празните меѓупростори при поврзувањето на основините и јаточните жици. Врз основа на добиените резултати може да се констатира дека сите анализирани Е - стаклени ткаенини имаат поголема јачина на истегнување во надолжна насока отколку во напречна насока.

5.2.4 Испитување на својствата на полимерните композити плочи зајакнати со Е - стаклена ткаенина (Testing the properties of polymer composite plates reinforcement with E- woven structure)

5.2.4.1 Определување на содржината на составните компоненти во композитните примероци (Determination of the content of the constituent components in the composite samples)

Определувањето на содржината на составните компоненти во композитните материјали е значајно затоа што количеството на зајакнувачката компонента во композитната структура може значајно да влијае врз нивната јачина. За определување на содржината на составните компоненти и теоретската густина на полимерните композитни плочи беше користен стандардот ASTM D3171 (ASTM D3171, 2015).

На Слика 5.8 е прикажан изгледот на примероците од композитните плочи врз база на Е - стаклена ткаенина/ епоксид по процесот на горење, каде што јасно се гледа бројот на слоеви и структурата на користената зајакнувачка ткаенина.



Слика 5. 8 Горење на примероци од композитните плочи
Figure 5. 8 Burning of samples of composite plates

Содржината на пори (%) во композитните примероци беше определена со примена на стандардите ASTM D792/ASTM D2734 /ASTM D2584 (ASTM D792, 2008; ASTM D2734, 2011 и ASTM D2584, 1994).

Резултатите од испитаните масени удели на стаклената ткаенина и на епоксидна смола во добиените композитни примероци се дадени во Табела 5. 7 додека вредностите за волуменскиот удел на конституентите, теоретската и експерименталната густина на примероците како и пресметаниот процент на пори се дадени во Табела 5. 8. Индивидуалните густини на конституентите се земани како готови вредности од производителот и при пресметките земена е густина на стаклените влакна од 2,56 g/cm3 и густина на епоксидната смола од 1,10 g/cm3.

Во Табела 5. 9 се претставени добиените средни вредности за масениот и волуменскиот удел на зајакнувачката компонента и смолата, како и просечните вредности за пресметаниот процент на пори во испитуваните композитни примероци.

Табела 5. 7 Масен удел на стаклена ткаенина и епоксидна смола во добиените композитни примероци

Table 5. 7 Mass ratio of glass fabric and epoxy resin in the obtained composite samples

Број на пример./ Sample number		Маса пред горење/ Mass before burning, M_i (g)	Маса по горење/ Mass after burning, M_f (g)	Маса на смола/ Mass of resin, m_m (g)	Маса на ткаенина/ Mass of fabric, m_f (g)	Масен удел на смола/ Mass ratio of resin, W_m (%)	Масен удел на ткаенина/ Mass ratio of fabric, W_f (%)	Густина на смола / Density of resin, ρ_m (g/cm^3)	Густина на зајакнув./ Density of reinforc., ρ_f (g/cm^3)
I	1	1,7516	1,2125	0,5391	1,2125	30,78	69,22	1,1	2,56
	2	1,6386	1,1348	0,5038	1,1348	30,75	69,25	1,1	2,56
	3	1,555	1,083	0,472	1,083	30,35	69,65	1,1	2,56
	4	1,3685	0,9315	0,437	0,9315	31,93	68,07	1,1	2,56
	5	1,5469	1,0687	0,4782	1,0687	30,91	69,09	1,1	2,56
II	1	1,8168	1,3135	0,5033	1,3135	27,70	72,30	1,1	2,56
	2	1,6859	1,2106	0,4753	1,2106	28,19	71,81	1,1	2,56
	3	1,8706	1,3533	0,5173	1,3533	27,65	72,35	1,1	2,56
	4	1,7523	1,2293	0,523	1,2293	29,85	70,15	1,1	2,56
	5	1,7488	1,2474	0,5014	1,2474	28,67	71,33	1,1	2,56
III	1	1,9523	1,386	0,5663	1,386	29,01	70,99	1,1	2,56
	2	2,1115	1,5057	0,6058	1,5057	28,69	71,31	1,1	2,56
	3	2,1303	1,5265	0,6038	1,5265	28,34	71,66	1,1	2,56
	4	2,2178	1,5825	0,6353	1,5825	28,65	71,35	1,1	2,56
	5	2,1686	1,5322	0,6364	1,5322	29,35	70,65	1,1	2,56
IV	1	1,7856	1,2482	0,5374	1,2482	30,10	69,90	1,1	2,56
	2	1,7355	1,2103	0,5252	1,2103	30,26	69,74	1,1	2,56
	3	2,1851	1,5335	0,6516	1,5335	29,82	70,18	1,1	2,56
	4	1,7749	1,2457	0,5292	1,2457	29,82	70,18	1,1	2,56
	5	1,5904	1,1284	0,462	1,1284	29,05	70,95	1,1	2,56
V	1	1,9966	1,2753	0,7213	1,2753	36,13	63,87	1,1	2,56
	2	1,965	1,2644	0,7006	1,2644	35,65	64,35	1,1	2,56
	3	1,884	1,254	0,63	1,254	33,44	66,56	1,1	2,56
	4	2,015	1,3233	0,6917	1,3233	34,33	65,67	1,1	2,56
	5	2,1507	1,4325	0,7182	1,4325	33,39	66,61	1,1	2,56
VI	1	2,1425	1,4248	0,7177	1,4248	33,50	66,50	1,1	2,56
	2	1,9233	1,284	0,6393	1,284	33,24	66,76	1,1	2,56
	3	1,9597	1,3211	0,6386	1,3211	32,59	67,41	1,1	2,56
	4	2,045	1,3527	0,6923	1,3527	33,85	66,15	1,1	2,56
	5	1,7672	1,1698	0,5974	1,1698	33,80	66,20	1,1	2,56

Табела 5. 8 Волуменски удел на составните компоненти, теоретска, експериментална густина и процент на пори во композитните примероци

Table 5. 8 Volume ratio of components, theoretical, experimental density and percentage of voids in composite samples

Број на пример. / Sample number		**Маса пред горење/ Mass before burning, M_i (g)**	**Маса по горење/ Mass after burning, M_f (g)**	**Експериментална густина/ Experimental density, M_d, (g/cm^3)**	**Волуменски удел на смола/ Volume of resin, V_m (%)**	**Волуменски удел на зајакнувач/ Volume of reinforcement, V_f (%)**	**Теоретска густина/ Theor. density T_d (g/cm^3)**	**Процент на пори/ Percentage of voids, (%)**
I	**1**	1,7516	1,2125	1,7938	50,19	48,50	1,8175	1,308375
	2	1,6386	1,1348	1,7612	49,23	47,64	1,8181	3,129702
	3	1,555	1,0830	1,7721	48,90	48,21	1,8248	2,890281
	4	1,3685	0,9315	1,7644	51,22	46,91	1,7980	1,864374
	5	1,5469	1,0687	1,7499	49,18	47,22	1,8152	3,598619
II	**1**	1,8168	1,3135	1,7704	44,59	50,00	1,8718	5,414988
	2	1,6859	1,2106	1,7771	45,55	49,85	1,8629	4,60825
	3	1,8706	1,3533	1,7626	44,31	49,81	1,8726	5,87906
	4	1,7523	1,2293	1,7704	48,04	48,51	1,8336	3,450206
	5	1,7488	1,2474	1,7556	45,76	48,92	1,8543	5,322377
III	**1**	1,9523	1,386	1,8171	47,92	50,39	1,8484	1,691695
	2	2,1115	1,5057	1,8201	47,47	50,70	1,8540	1,828176
	3	2,1303	1,5265	1,8357	47,30	51,38	1,8602	1,318556
	4	2,2178	1,5825	1,8317	47,70	51,05	1,8548	1,246323
	5	2,1686	1,5322	1,8184	48,51	50,19	1,8424	1,302945
IV	**1**	1,7856	1,2482	1,8176	49,73	49,63	1,8293	0,638886
	2	1,7355	1,2103	1,7968	49,43	48,95	1,8264	1,62253
	3	2,1851	1,5335	1,8092	49,04	49,60	1,8341	1,358911
	4	1,7749	1,2457	1,8038	48,89	49,45	1,8342	1,657269
	5	1,5904	1,1284	1,8299	48,33	50,72	1,8476	0,957168
V	**1**	1,9966	1,2753	1,6939	55,63	42,26	1,7303	2,104748
	2	1,965	1,2644	1,7142	55,56	43,09	1,7377	1,350838
	3	1,884	1,254	1,6753	50,93	43,56	1,7731	5,515648
	4	2,015	1,3233	1,6858	52,61	43,25	1,7587	4,146888
	5	2,1507	1,4325	1,6800	51,00	43,71	1,7738	5,289845
VI	**1**	2,1425	1,4248	1,7632	53,70	45,80	1,7721	0,500613
	2	1,9233	1,2840	1,7642	53,31	46,01	1,7763	0,683882
	3	1,9597	1,3211	1,7671	52,35	46,53	1,7871	1,118112
	4	2,045	1,3527	1,7828	54,87	46,06	1,7663	-0,92948
	5	1,7672	1,1698	1,7476	53,71	45,19	1,7671	1,10324

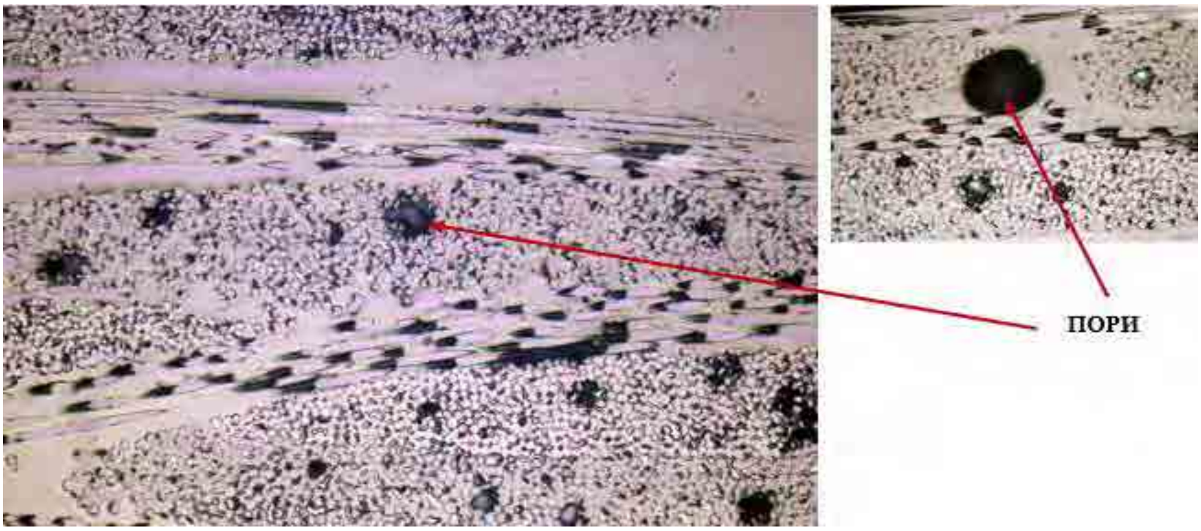
Табела 5. 9 Просечни вредности за масениот и волуменскиот удел на стаклената ткаенина и епоксидната смола и процент на пори кај композитните плочи
Table 5. 9 Average values for the mass and volume ratio of glass fabric and epoxy resin and percentage of voids in the composite samples

Број на пример./ Sample number	**Масен удел на смола/ Mass ratio of resin, W_m (%)**	**Масен удел на ткаенина/ Mass ratio of reinforcement, W_f (%)**	**Волуменски удел на смола/ Volume of resin, V_m(%)**	**Волум. удел на зајакнувач/ Volume of reinforcement, V_f (%)**	**Просечна вредност на пори/ Average voids %**
I	30,94	69,06	49,74	47,70	2,56
II	28,41	71,59	45,65	49,42	4,93
III	28,81	71,19	47,78	50,74	1,48
IV	29,81	70,19	49,08	49,67	1,25
V	34,59	65,41	53,15	43,17	3,68
VI	33,40	66,60	53,59	45,92	0,85

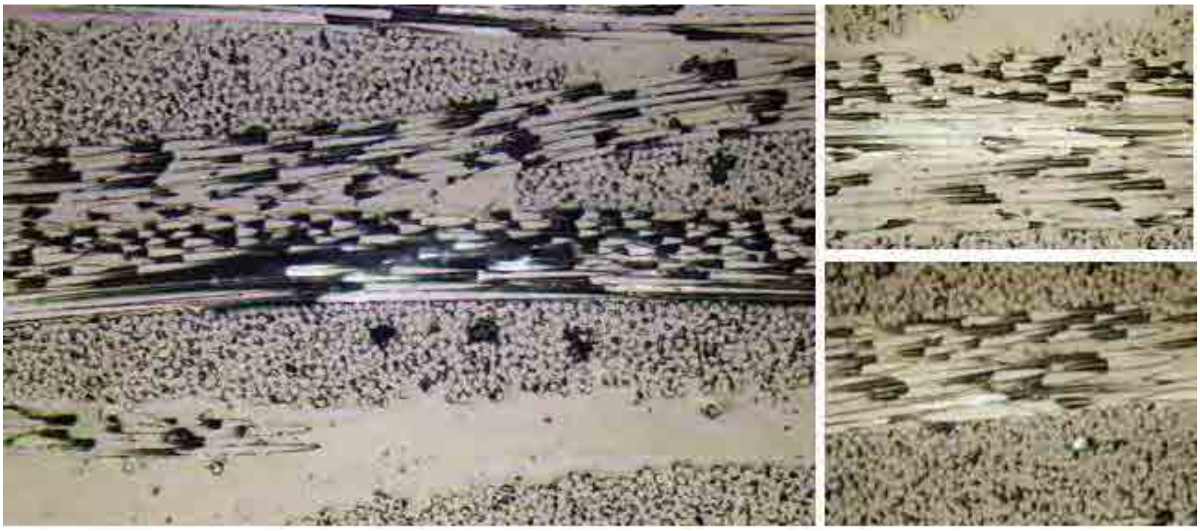
Врз основа на добиените резултати за содржина на конституентите во композитните примероци (таб. 5. 7, таб. 5. 8 и таб. 5. 9) може да се констатира дека има многу добра содржина на стаклена ткаенина и епоксидна смола во добиените композитни примероци. Масениот удел на зајакнувачката компонента се движи од 65 - 72 %, додека епоксидната смола е застапена со 28 - 35 %, а тоа укажува дека произведените композитни структури ќе резултираат во материјал со добри механички својства. Најмал е масениот удел на зајакнувачката компонента кај композитните примероци зајакнати со панама ткаенина (65,41 %). Ова е и очекувано бидејќи колку е поголем просторот помеѓу основините и јаточните предива, полесна е инфилтрацијата на смолата и овие примероци ќе имаат пониски вредности за механичките карактеристики. Вкупниот масен удел на зајакнувачката компонента се намалува со зголемување на растојнието помеѓу двата система на предива (Nalik & Shembekar, 1992).

Иако е постигнат добар сооднос помеѓу зајакнувачката компонента и епоксидната смола, сепак кај дел од изработените композитни плочи процентот на пори е релативно висок, што директно ќе се рефлектира врз механичките својства на примероците. Највисок процент на пори (4,93 %) е забележан кај композитните плочи зајакнати со платно, пресувани при притисок од 40 bar и композитните примероци зајакнати со панама ткаенина (3,68 %), пресувани при притисок од 30 bar. За разлика од нив, композитните примероци зајакнати со кепер ткаенина имаат релативно мал процент на пори (1,48 и 1,25 %).

Со цел да се види квалитетот на импрегнацијата на Е - стаклените ткаенини со епоксидната матрица за време на процесот на пресување, беа направени микрофотографии за дел од композитните примероци со помош на оптички микроскоп. На Слика 5. 9 и Слика 5. 10 се претставени микрофотографии од веќе тестираните примероци со најголем и најмал процент на пори. На Слика 5. 9 јасно се гледа присуството на поголем број на пори во матрицата, што е последица на процесот на рачна импрегнација, бидејќи нанесувањето и распределбата на смолата врз зајакнувачката ткаенина го вршевме со импровизиран ролер. На ова се должи и значителната варијација на процентот на пори (0,85 – 4,93 %) кај различните композитни примероци.



Слика 5. 9 Микрофотографии од примерок со голем процент на пори
Figure 5. 9 Microphotographs from a sample with a high percentage of voids



Слика 5. 10 Микрофотографии од примерок со мал процент на пори
Figure 5. 10 Microphotographs from a sample with a small percentage of voids

Maja Mijajlovikj со соработниците (Mijajlovikj et al., 2017) во својата студија за изработка на композитните плочи врз база на платно ткаенина/ епоксид користеле препрег добиен со машинска импрегнација. Резултатите од тестирањето покажале дека овие композитни примероци имаат значително помал процент на пори. Тоа значи дека доколку за изработка на препрегот се користи машинска импрегнација процентот на пори во композитните примероци ќе биде значително помал.

5.2.4.2 Јачина на свиткување и модул на еластичност при свиткување (Flexural strength and modulus of elasticity in flexure)

Јачината на свиткување и модулот на еластичност при свиткување беа испитувани според стандардот EN ISO 14125 (EN ISO 14125, 1998). Димензиите на примероците за тестирање на јачината на свиткување со примена на методата со три точки на свиткување се прикажани во Табела 5 10.

Табела 5. 10 Димензии на примероците за испитување на јачина на свиткување
Table 5. 10 Dimensions of the samples for testing the bending strength

Број на примерок/ Sample number			**Ширина/ Width b (mm)**	**Дебелина/ Thickness h (mm)**	**Должина/ Length L (mm)**	**Растојание/ Distance L_0 (mm)**
I-1	**10c/14B-MD**	**I - 1-1**	15,33	2,25	59,98	40
		I - 1-2	15,20	2,27	60,31	40
		I - 1-3	15,40	2,25	59,79	40
		I - 1-4	15,39	2,25	60,12	40
		I - 1-5	15,00	2,25	60,27	40
I-2	**10c/14B-CD**	**I - 2-1**	15,27	2,34	59,91	40
		I - 2-2	15,30	2,32	60,04	40
		I - 2-3	15,27	2,33	59,60	40
		I - 2-4	15,29	2,35	60,25	40
		I - 2-5	15,34	2,37	60,33	40
II-3	**10c/18A-MD**	**II - 3-1**	15,28	2,22	60,39	40
		II - 3-2	15,31	2,22	60,26	40
		II - 3-3	15,36	2,22	60,04	40
		II - 3-4	15,34	2,19	60,47	40
		II - 3-5	15,23	2,19	60,28	40
II-4	**10c/18A-CD**	**II - 4-1**	15,35	2,18	60,36	40
		II - 4-2	15,37	2,18	60,11	40
		II - 4-3	15,18	2,19	59,72	40
		II - 4-4	15,20	2,25	59,61	40
		II - 4-5	15,18	2,26	59,95	40
III-1	**10c/14B-**	**III - 1-1**	15,46	2,63	60,43	40

	MD	**III - 1-2**	15,35	2,68	60,40	40
		III - 1-3	15,42	2,60	60,13	40
		III - 1-4	15,38	2,68	60,23	40
		III - 1-5	15,45	2,85	60,48	40
III-2	**10c/14B-CD**	**III - 2-1**	15,44	2,55	60,11	40
		III - 2-2	15,33	2,58	60,09	40
		III - 2-3	15,16	2,54	60,06	40
		III - 2-4	15,28	2,58	60,47	40
		III - 2-5	15,15	2,59	60,21	40
IV-3	**10c/18A-MD**	**IV - 3-1**	15,08	2,09	59,87	40
		IV - 3-2	15,44	2,10	60,01	40
		IV - 3-3	15,36	2,09	60,21	40
		IV - 3-4	15,22	2,05	60,12	40
		IV - 3-5	15,42	2,07	60,27	40
IV-4	**10c/18A-CD**	**IV - 4-1**	15,00	2,07	60,30	40
		IV - 4-2	15,42	2,15	59,40	40
		IV - 4-3	15,39	2,13	59,86	40
		IV - 4-4	15,23	2,15	60,42	40
		IV - 4-5	15,43	2,09	60,02	40
V-1	**10c/14B-MD**	**V - 1-1**	15,43	2,94	60,27	40
		V - 1-2	15,41	2,92	60,29	40
		V - 1-3	15,23	2,91	60,48	40
		V - 1-4	15,30	2,91	60,29	40
		V - 1-5	15,34	2,94	60,40	40
V-2	**10c/14B-CD**	**V - 2-1**	15,53	2,87	60,48	40
		V - 2-2	15,30	2,93	60,38	40
		V - 2-3	15,40	2,90	60,56	40
		V - 2-4	15,42	2,91	60,23	40
		V - 2-5	15,46	2,93	60,38	40
VI-3	**10c/18A-MD**	**VI - 3-1**	15,38	2,71	60,34	40
		VI - 3-2	15,40	2,72	60,31	40
		VI - 3-3	15,30	2,80	60,40	40
		VI - 3-4	15,31	2,76	60,29	40
		VI - 3-5	15,33	2,75	60,59	40
VI-4	**10c/18A-CD**	**VI - 4-1**	15,35	2,79	59,83	40
		VI - 4-2	15,45	2,82	60,39	40
		VI - 4-3	15,37	2,74	60,29	40
		VI - 4-4	15,33	2,76	60,46	40
		VI - 4-5	15,37	2,78	60,37	40

*10c –десет листови – слоеви од препрег

*18 A –притисокот на прес машината од 18 kg/cm^2 (40 bar)

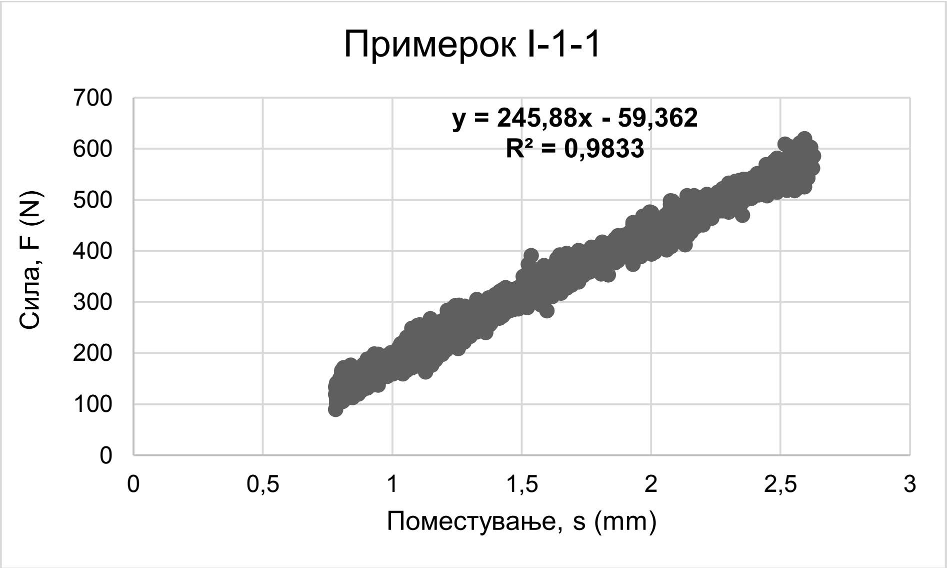
*14 B –притисокот на прес машината од 14 kg/cm^2 (30 bar)

*1 – MD дирекција т.е. во правец на машината

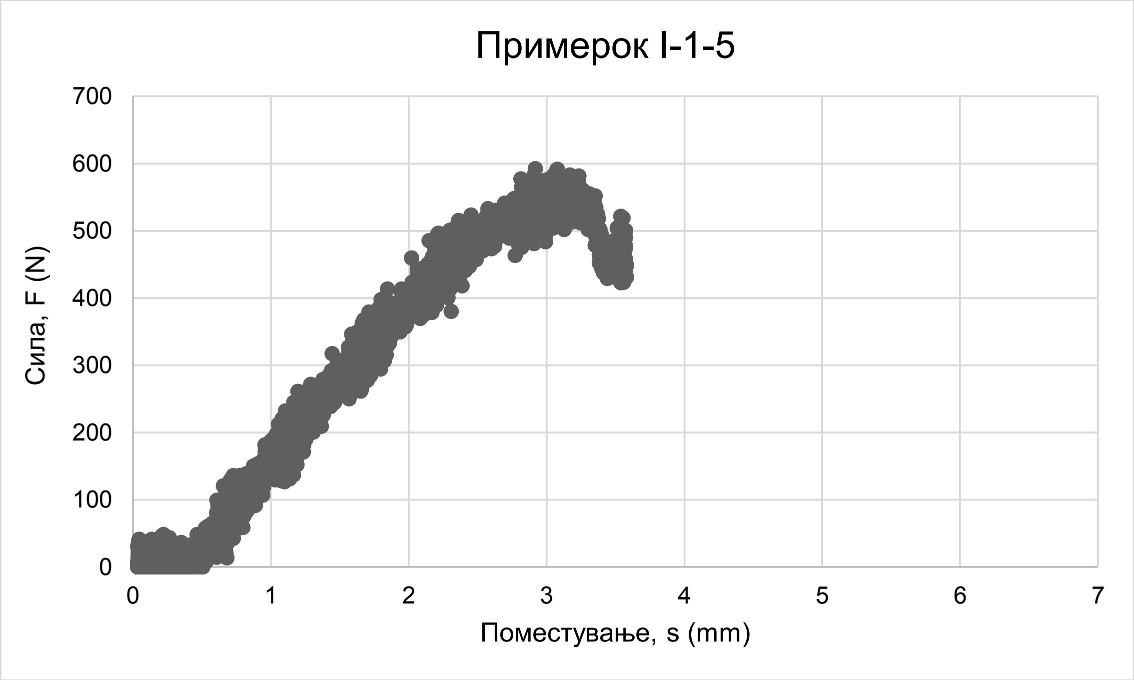
*2 – CD дирекција т.е. спротивно од правецот на машината

Кривите сила - поместување кои се добиени од универзалната машина за испитување за дел од испитуваните примероци се претставени на Слика 5. 12 - Слика 5. 23. Вакви дијаграми како што се прикажани на Слика 5. 12 - Слика 5. 23 се добиени за сите тестирани примероци, но во докторската дисертација се прикажани само по две од серијата тестирања за сите типови на изработени композитни плочи. Дијаграмите за сите тестирани примероци се дадени во прилог 10.4 - 10.9. Добиените криви за сите тестирани примероци го имаат истиот облик, линеарно растат до одредена максимална сила на издржливост, а потоа кривата опаѓа до комплетна деструкција на тест примерокот.

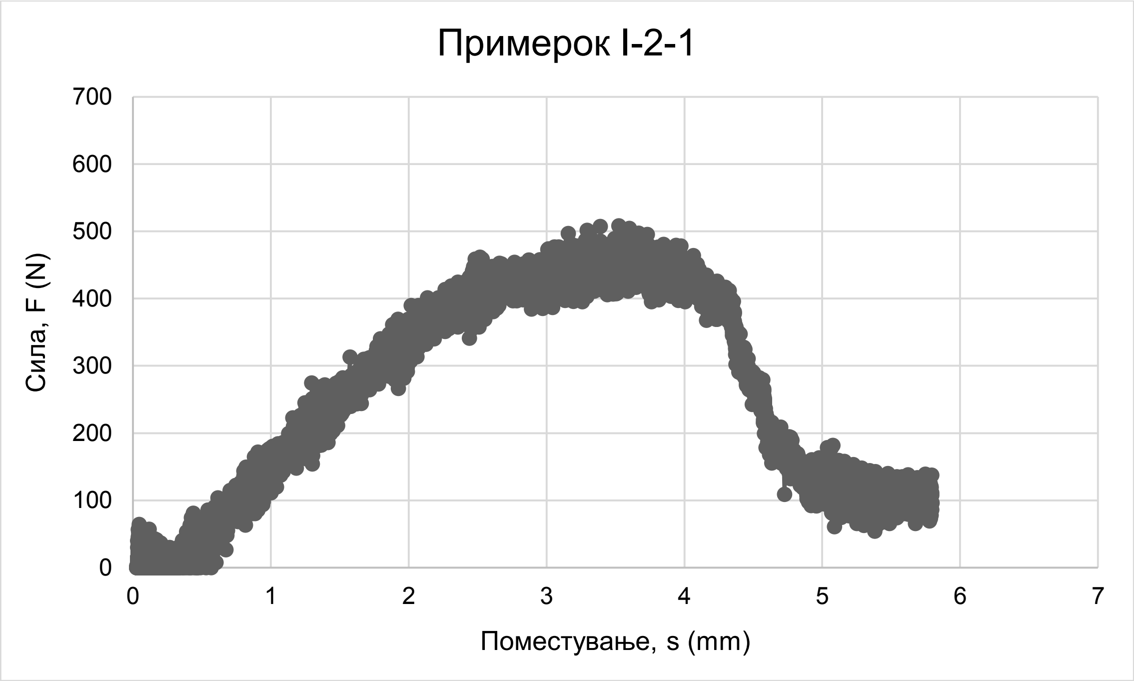
Кривите сила - поместување имаат еден линеарен дел. Со примена на методот на најмали квадрати се опишува линеарна крива за да се пресмета модулот на еластичност при свиткување. Права линија се повлекува од местото каде започнува порастот на силата. Од линеарната крива која се добива со корелација на грешка ~ R=0,99 се пресметува модулот на еластичност (сл. 5. 11). Од кривите сила - поместување и со помош на равенките 4.10, 4.11 и 4.12 се пресметани напрегањето на свиткување, деформацијата и модулот на еластичност при свиткување. Во Табела 5. 11, Табела 5. 12 и Табела 5. 13 се презентирани добиените резултати од испитување на јачината на свиткување на изработените композитни плочи зајакнати со различни видови на Е – стаклени ткаенини.

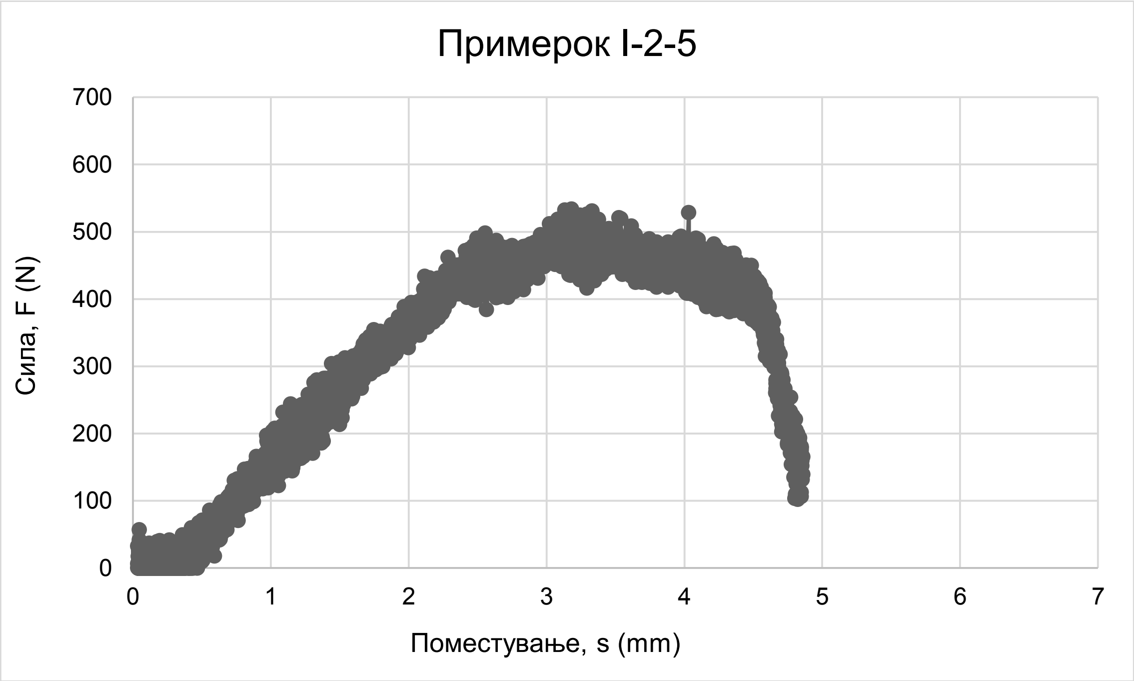


Слика 5. 11 Определување на модул на еластичност за тест примерок I-1-1
Figure 5. 11. Determination of modulus of elasticity for for test samples I-1-1



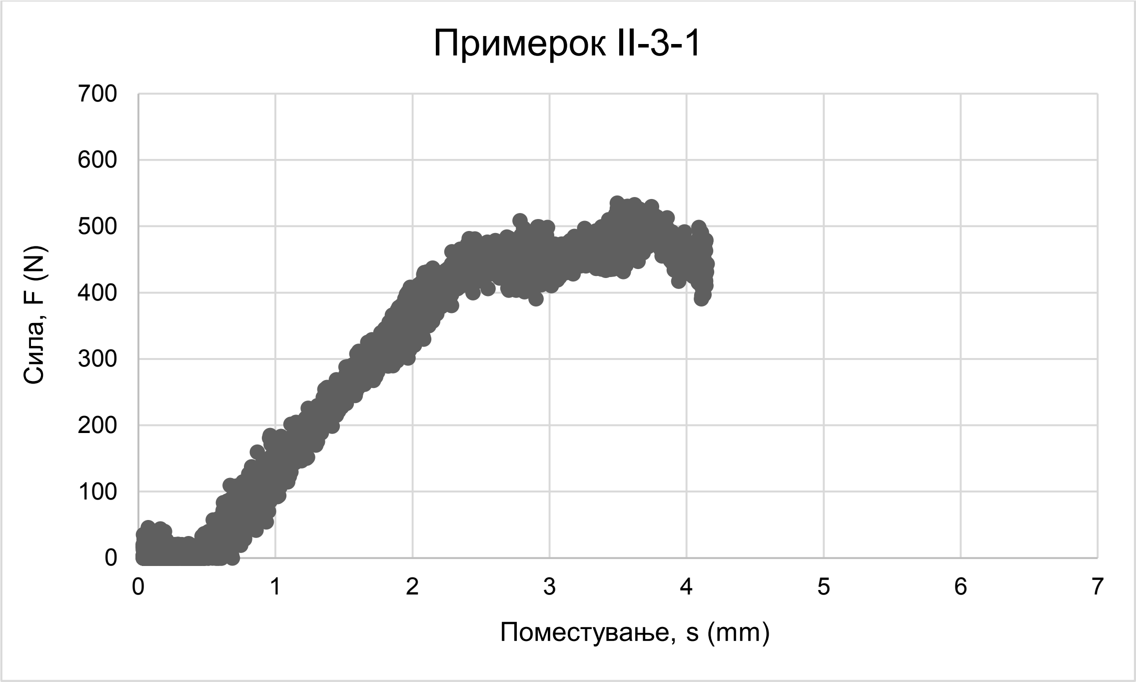
Слика 5. 12 Криви сила – поместување за тест примероците I-1-1 и I-1-5
Figure 5. 12 Force and displacement graphs for test samples I-1-1 and I-1-5

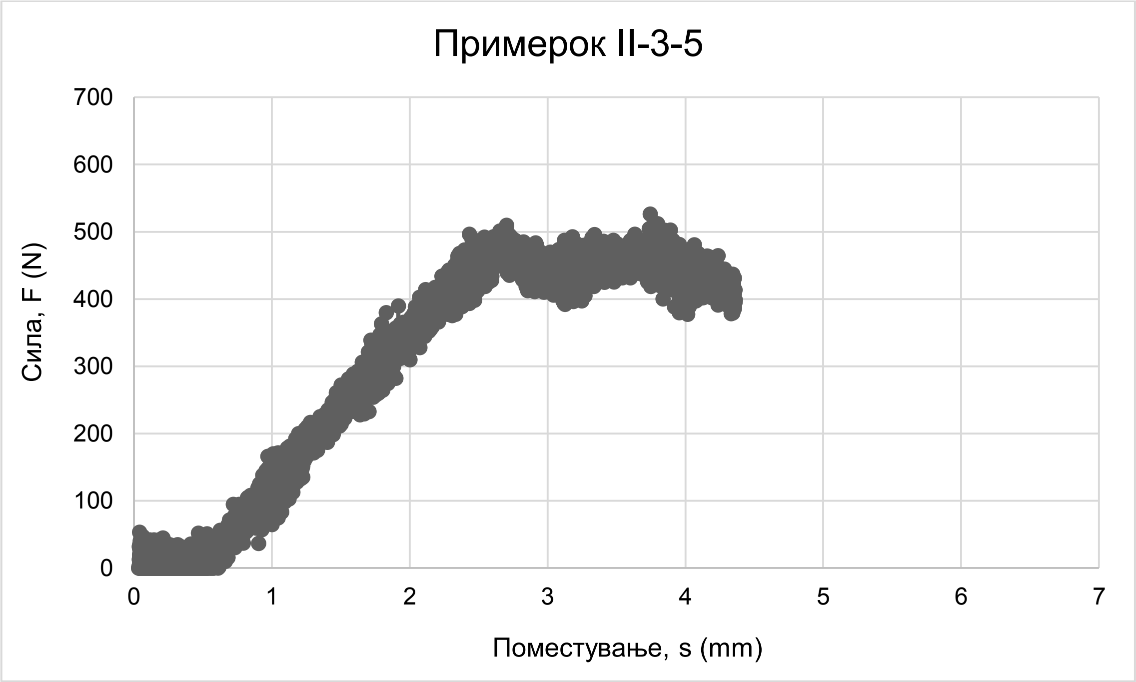




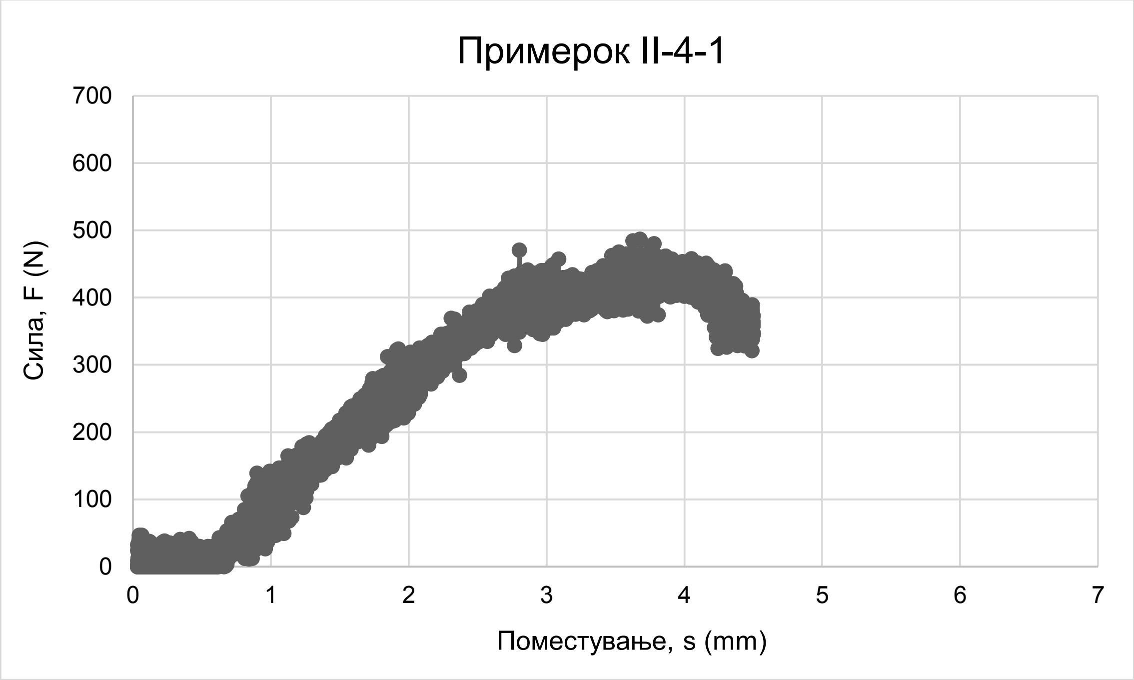
Слика 5. 13 Криви сила – поместување за тест примероците I-2-1 и I-2-5

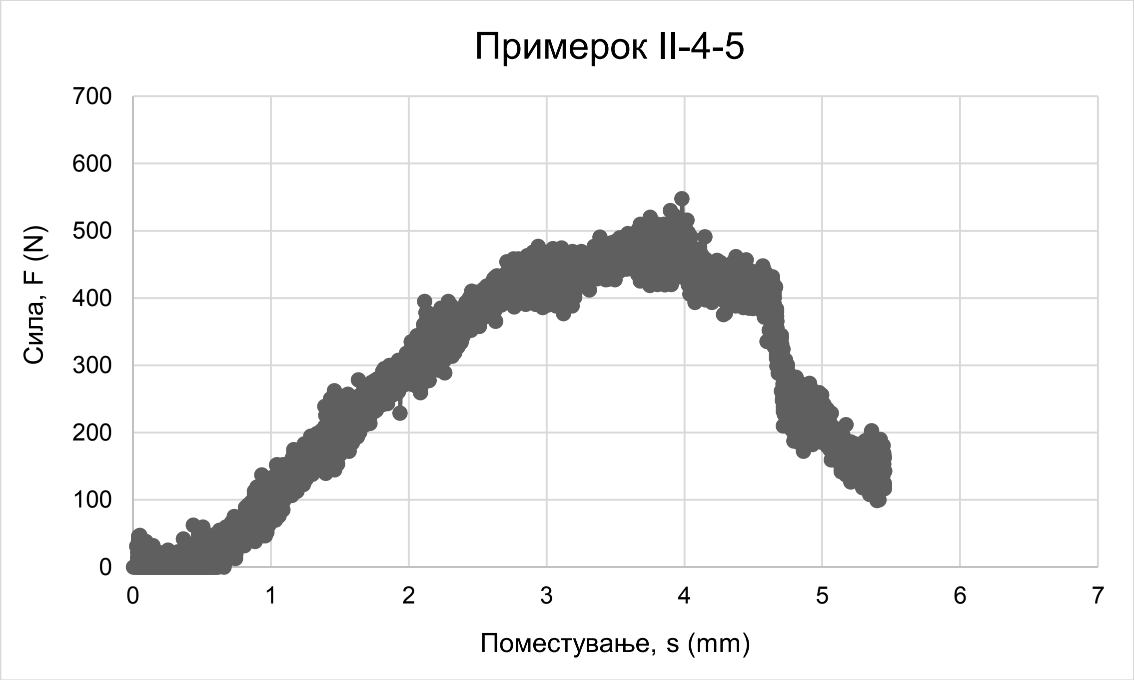
Figure 5. 13 Force and displacement graphs for test samples I-2-1 and I-2-5



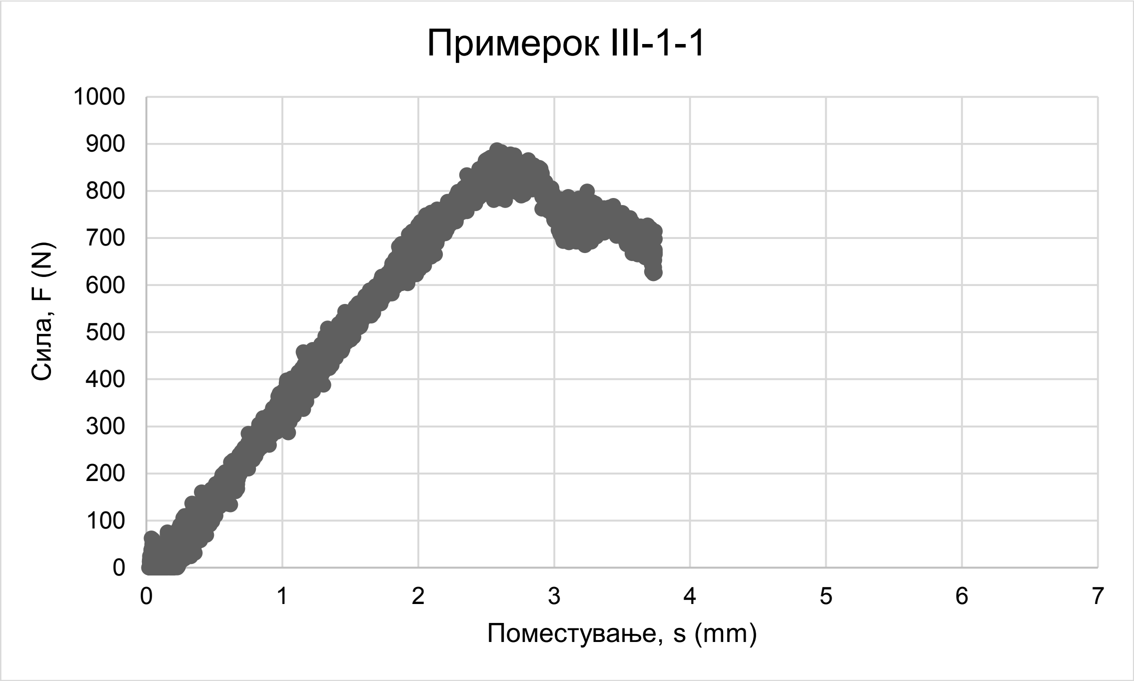


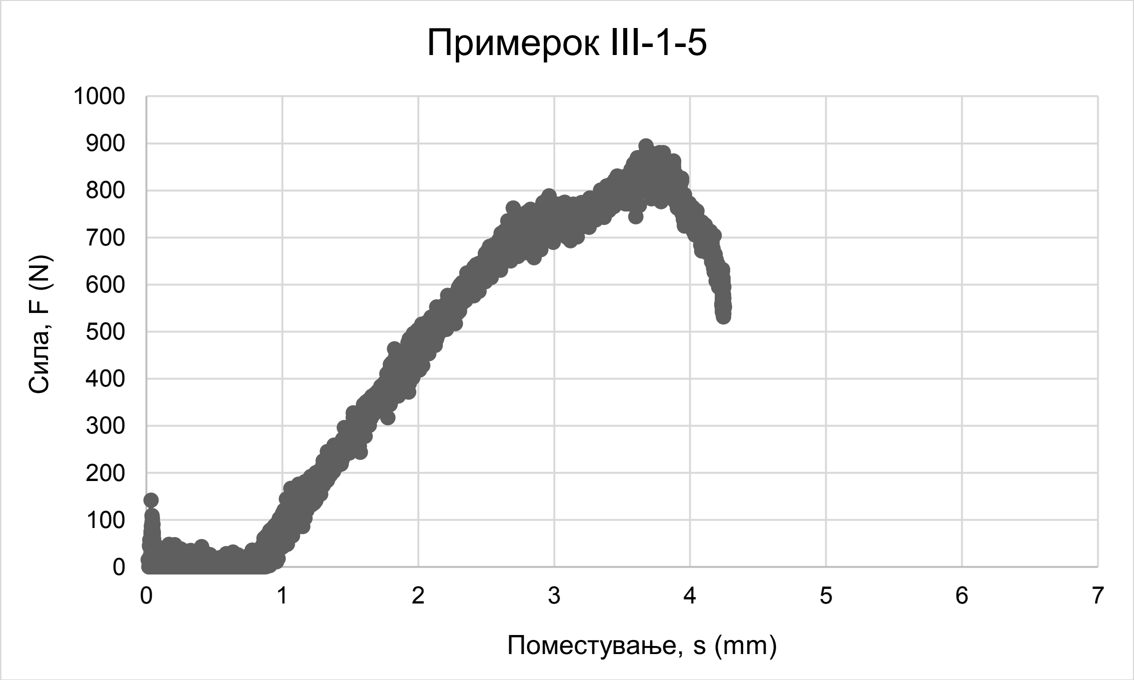
Слика 5. 14 Криви сила – поместување за тест примероците II-3-1 и II-3-5
Figure 5. 14 Force and displacement graphs for test samples II-3-1 and II-3-5



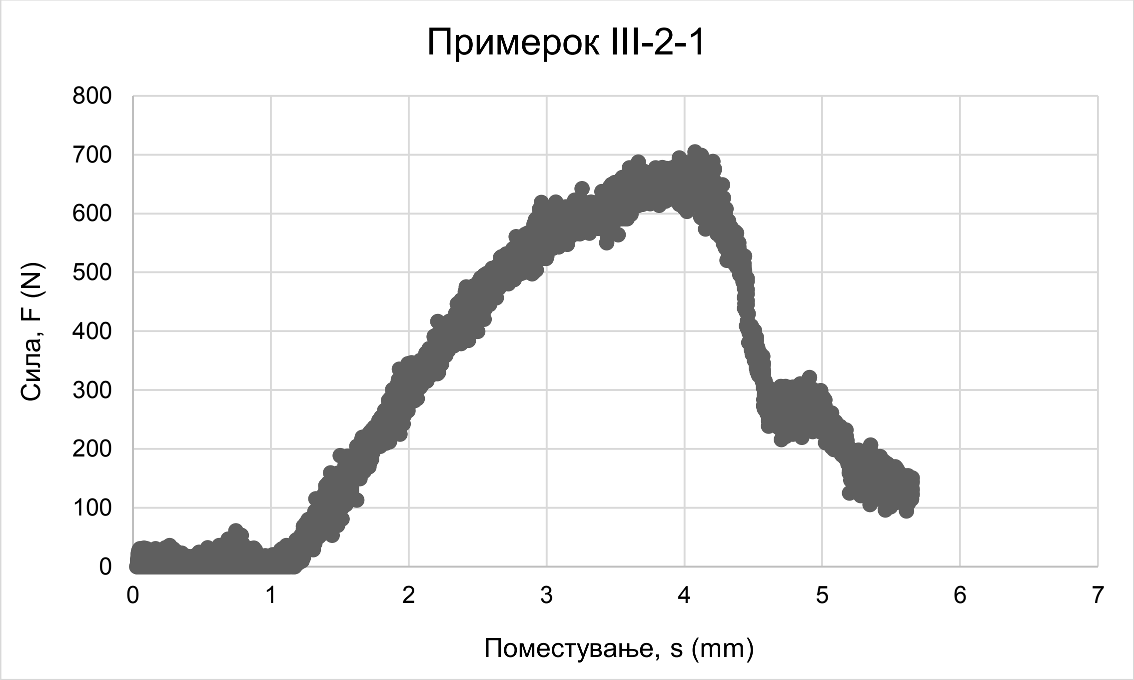


Слика 5. 15 Криви сила – поместување за тест примероците II-4-1 и II-4-5
Figure 5. 15 Force and displacement graphs for test samples II-4-1 and II-4-5

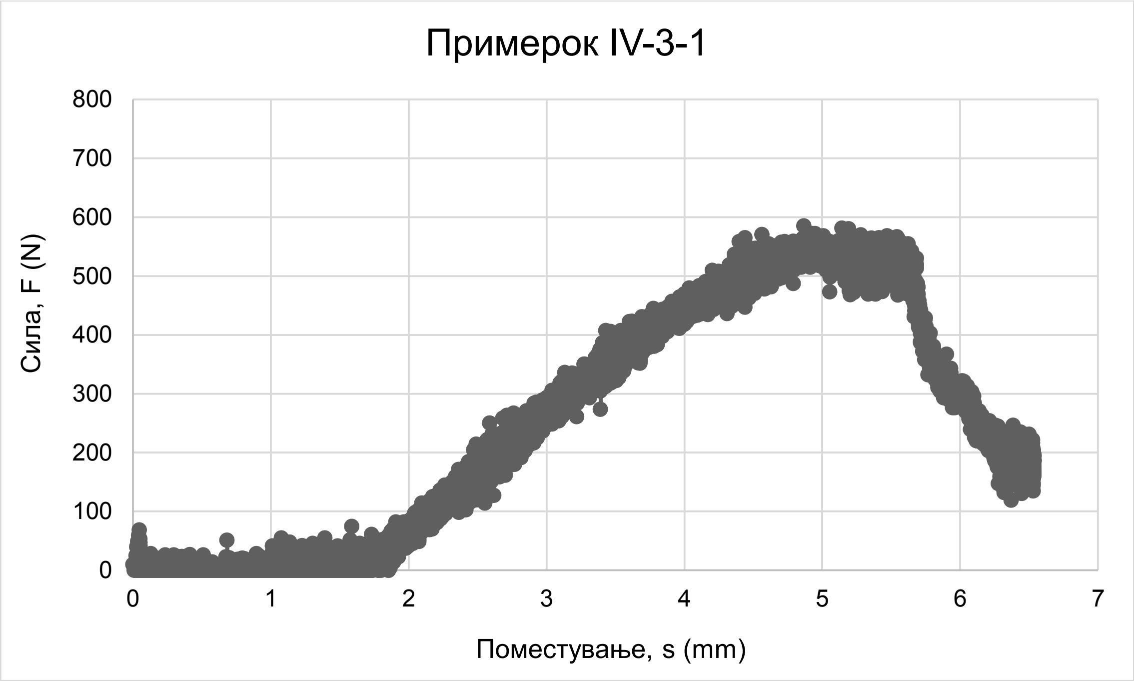


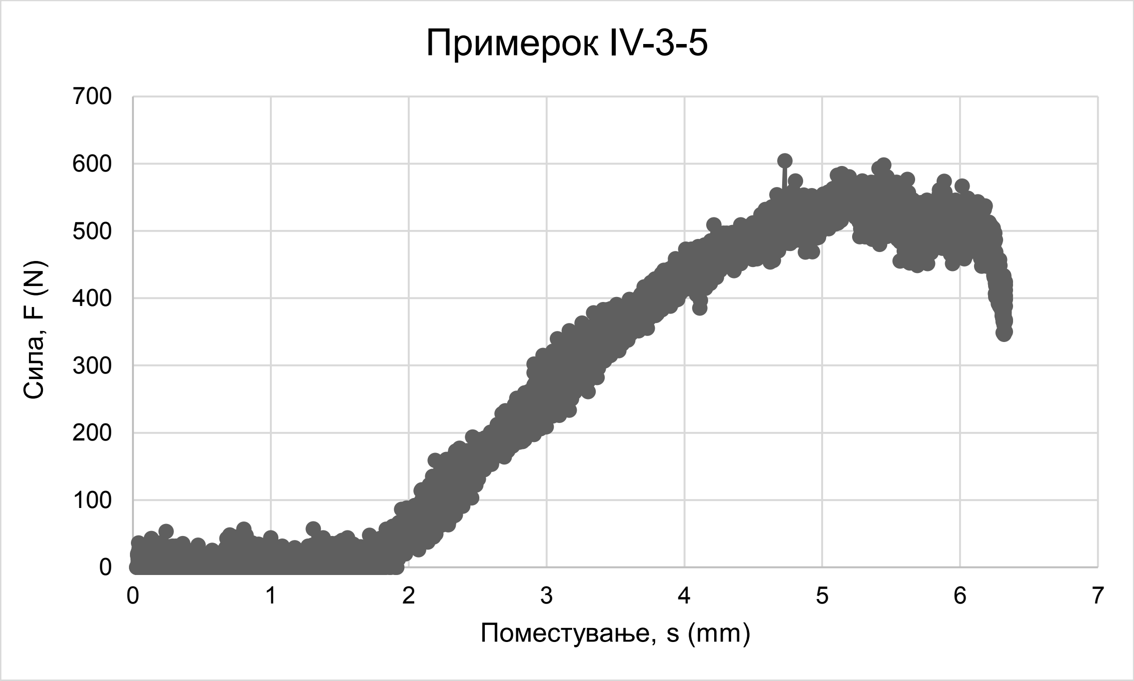


Слика 5. 16 Криви сила – поместување за тест примероците III-1-1 и III-1-5
Figure 5. 16 Force and displacement graphs for test samples III-1-1 and III-1-5

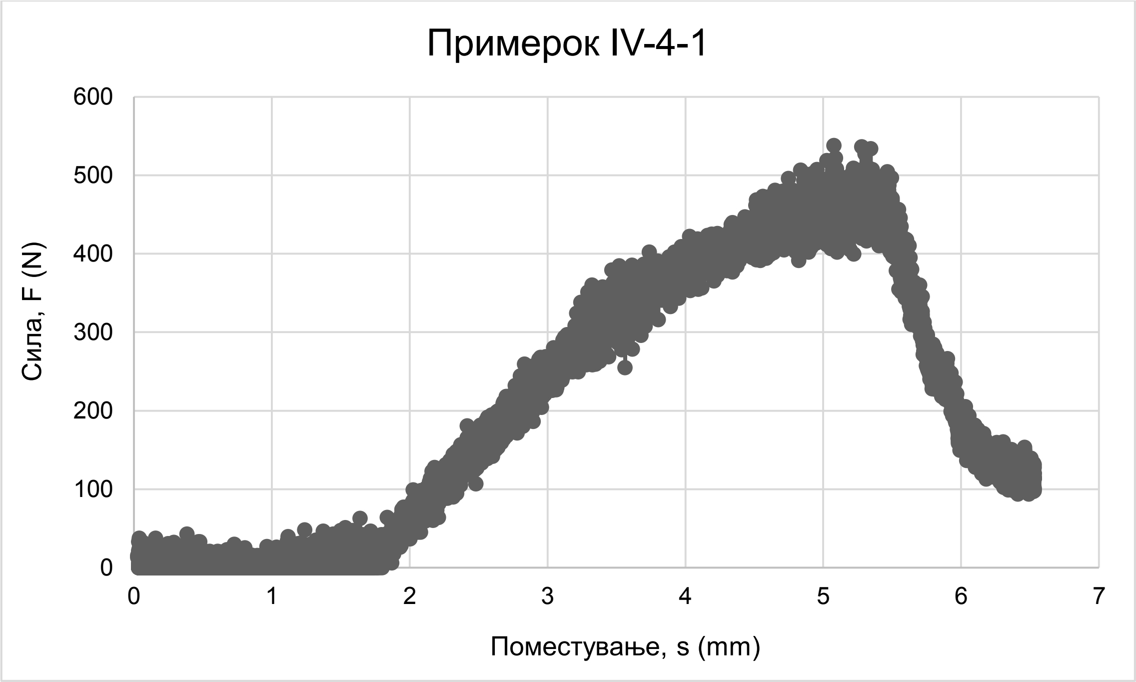


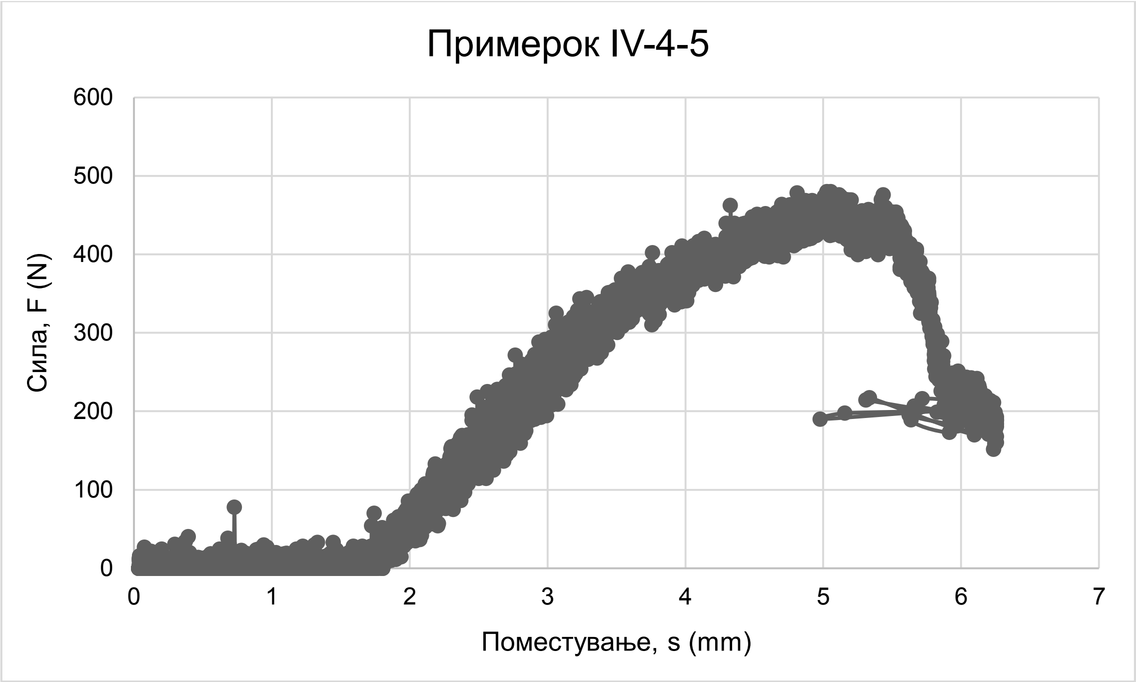
Слика 5. 17 Криви сила – поместување за тест примероците III-2-1 и III-2-5
Figure 5. 17 Force and displacement graphs for test samples III-2-1 and III-2-5



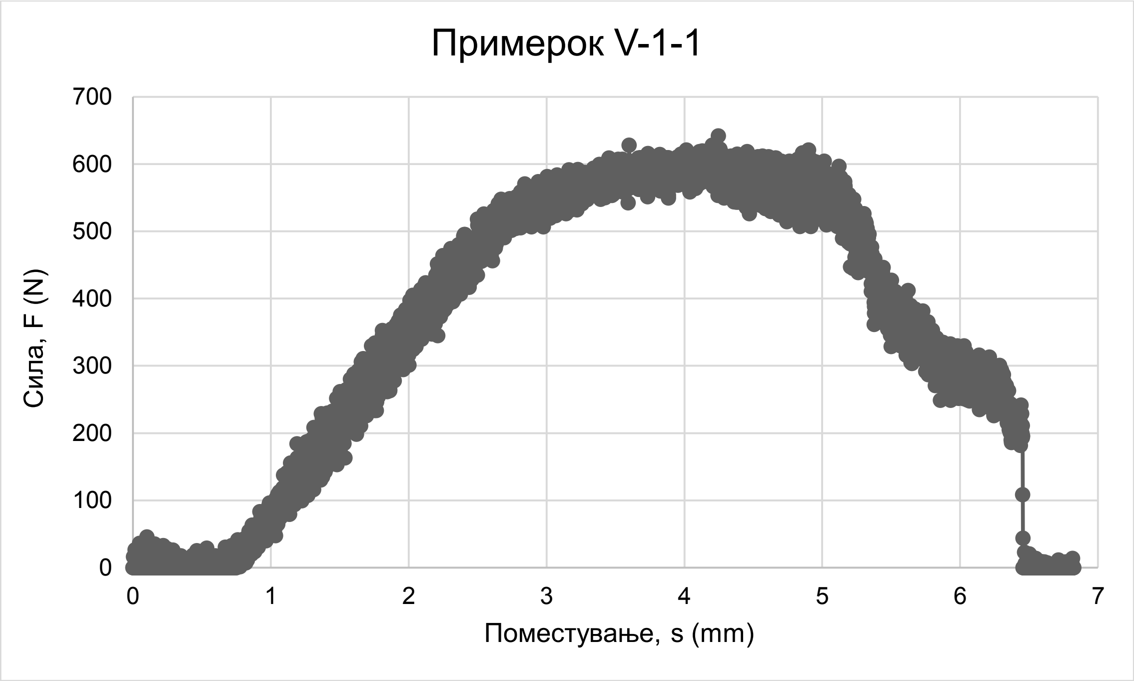


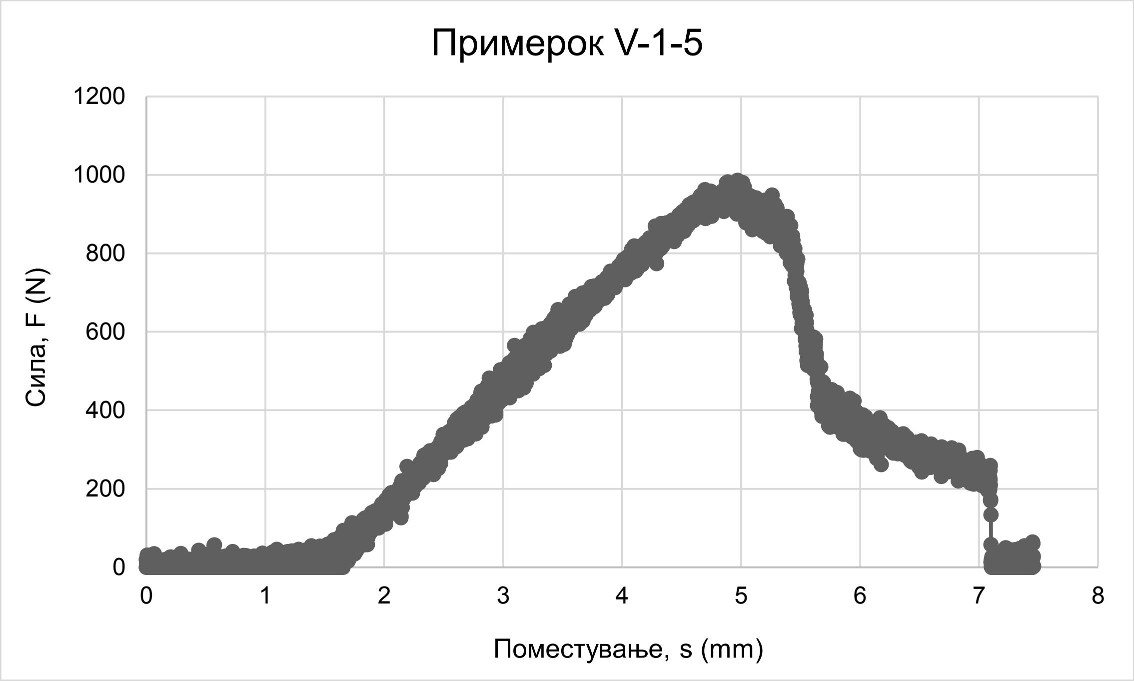
Слика 5. 18 Криви сила – поместување за тест примероците IV-3-1 и IV-3-5
Figure 5. 18 Force and displacement graphs for test samples IV-3-1 and IV-3-5





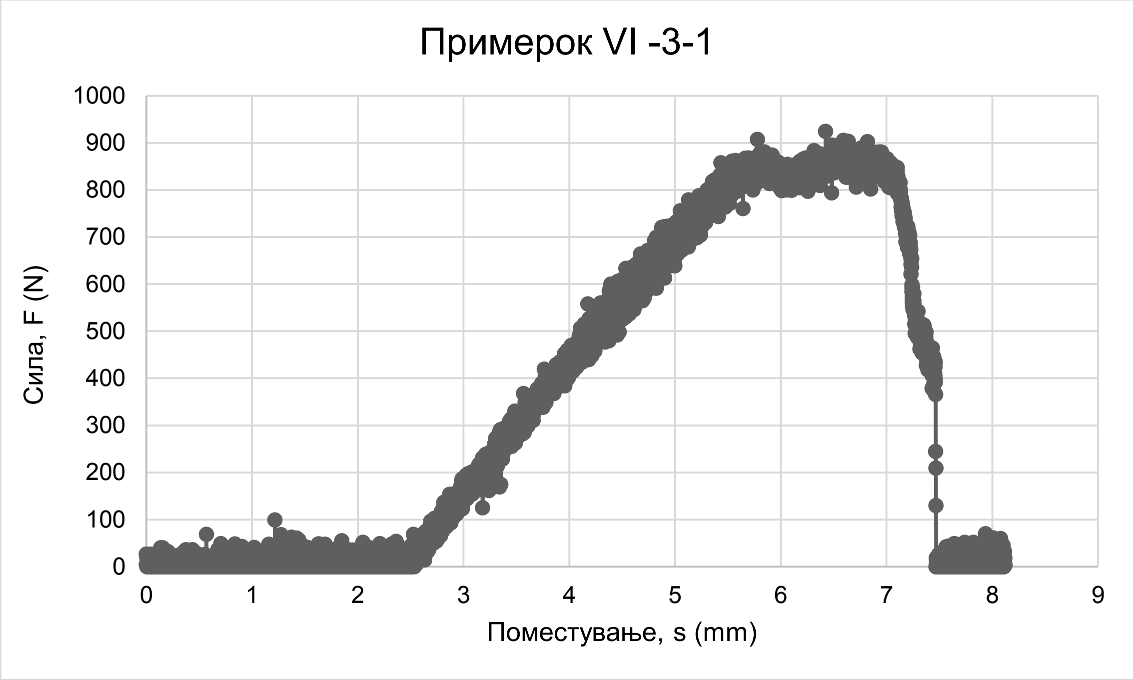
Слика 5. 19 Криви сила – поместување за тест примероците IV-4-1 и IV-4-5
Figure 5. 19 Force and displacement graphs for test samples IV-4-1 and IV-4-5

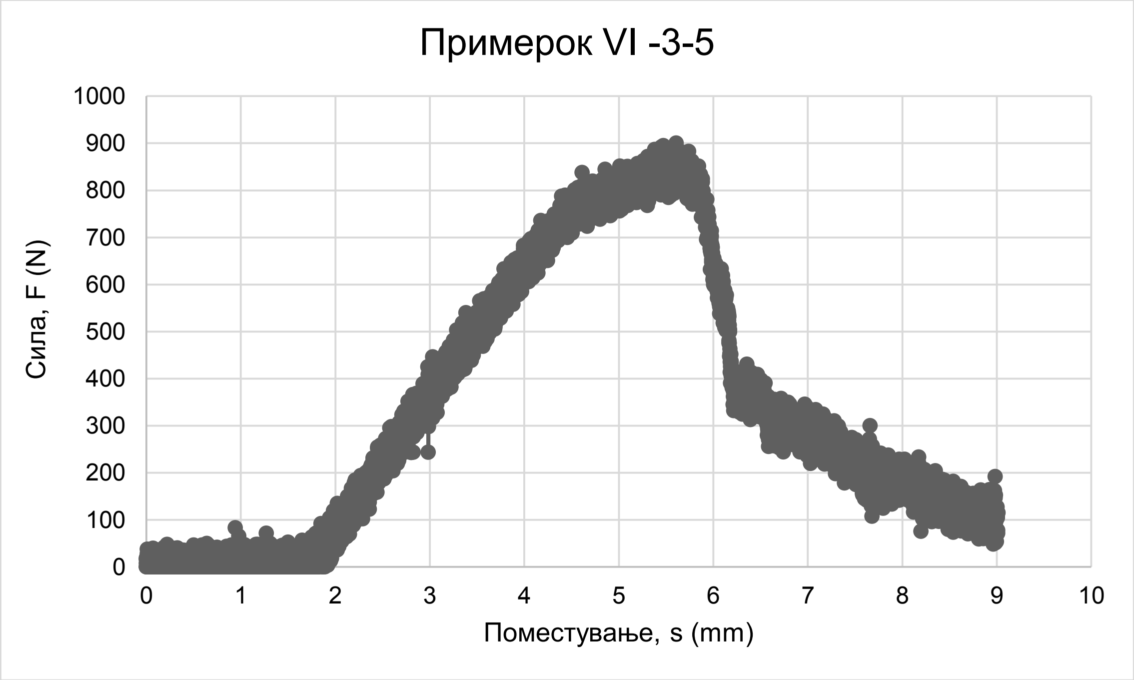




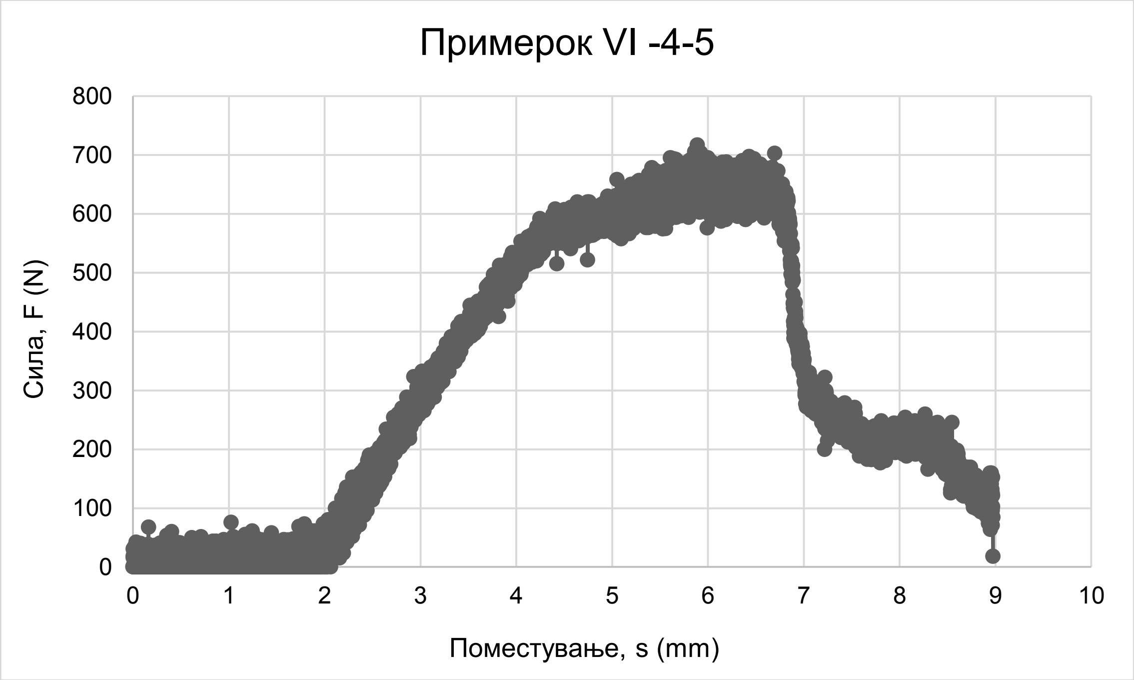
Слика 5. 20 Криви сила – поместување за тест примероците V-1-1 и V-1-5
Figure 5. 20 Force and displacement graphs for test samples V-1-1 and V-1-5

Слика 5. 21 Криви сила – поместување за тест примероците V-2-1 и V-2-5
Figure 5. 21 Force and displacement graphs for test samples V-2-1 and V-2-5





Слика 5. 22 Криви сила – поместување за тест примероците VI-3-1 и VI-3-5
Figure 5. 22 Force and displacement graphs for test samples VI-3-1 and VI-3-5



Слика 5. 23 Криви сила – поместување за тест примероците VI-4-1 и VI-4-5
Figure 5. 23 Force and displacement graphs for test samples VI-4-1 and VI-4-5

Табела 5. 11 Добиени вредности при испитување на јачина на свиткување на композитните плочи зајакнати со платно ткаенина (примерок 1)

Table 5. 11 Obtained values from testing the bending strength of composite plates reinforced with plain fabric (sample 1)

Број на примерок/ Sample number			Ширина/ Width, **b (mm)**	Дебелина/ Thickness, **h (mm)**	Должина/ Length, L **(mm)**	Растојание/ Distance, **L_0 (mm)**	Јачина на свиткување/ Bending strength **Fmax (N)**	Поместување/Displacement **S (mm)**	**ΔF**	**Δs**	$\frac{\Delta F}{\Delta s}$	Напрегање на свиткување/ Flexural strain, **σf (MPa)**	Модул на еластичност при свиткување/ Modulus of bending, **Ef (GPa)**	Деформација при свиткување/ Bending deformation, **εf (%)**
I-1	**10c/14B-MD**	**1-1**	15,33	2,25	59,98	40	636,29	5,66	1,83	460,05	251,39	491,925	23,035	4,776
		1-2	15,20	2,27	60,31	40	625,61	4,31	2,04	550,08	269,65	479,247	24,266	3,669
		1-3	15,40	2,25	59,79	40	659,18	3,78	1,69	402,83	238,36	507,305	21,741	3,189
		1-4	15,39	2,25	60,12	40	600,43	4,43	1,96	399,78	203,97	462,394	18,617	3,738
		1-5	15,00	2,25	60,27	40	592,04	2,89	2,01	408,94	203,45	467,785	19,052	2,438
		Просечна вредност/ Average					**622,71**					**481,731**	**21,342**	**3,562**
I-2	**10c/14B-CD**	**2-1**	15,27	2,34	59,91	40	508,12	4,70	1,71	333,40	194,97	364,625	15,944	4,124
		2-2	15,30	2,32	60,04	40	490,57	4,06	2,01	365,44	181,81	357,425	15,226	3,532
		2-3	15,27	2,33	59,60	40	485,23	3,80	1,75	344,09	196,62	351,195	16,287	3,320
		2-4	15,29	2,35	60,25	40	570,67	3,43	1,94	431,82	222,59	405,502	17,948	3,023
		2-5	15,34	2,37	60,33	40	534,06	4,55	2,07	439,45	212,55	371,894	16,653	4,044
		Просечна вредност/ Average					**517,73**					**370,128**	**16,412**	**3,609**
II-3	**10c/18A-MD**	**3-1**	15,28	2,22	60,39	40	534,82	0,82	1,91	386,81	202,52	426,118	19,382	0,683
		3-2	15,31	2,22	60,26	40	586,7	2,94	1,46	276,95	189,69	466,537	18,119	2,448
		3-3	15,36	2,22	60,04	40	571,44	2,89	1,67	386,05	231,17	452,923	22,009	2,406
		3-4	15,34	2,19	60,47	40	497,43	3,45	1,87	405,88	217,05	405,667	21,554	2,833
		3-5	15,23	2,19	60,28	40	526,43	3,6	1,87	431,82	230,92	432,418	23,097	2,957
		Просечна вредност/ Average					**543,36**					**436,733**	**20,832**	**2,265**
II-4	**10c/18A-CD**	**4-1**	15,35	2,18	60,36	40	486,75	3,6	1,85	324,25	175,27	400,346	17,634	2,943
		4-2	15,37	2,18	60,11	40	498,96	3,53	1,83	348,66	190,52	409,855	19,144	2,886
		4-3	15,18	2,19	59,72	40	461,58	3,57	2,08	360,87	173,50	380,398	17,410	2,932
		4-4	15,20	2,25	59,61	40	536,35	4,11	2,43	426,48	175,51	418,207	16,219	3,468
		4-5	15,18	2,26	59,95	40	547,79	4,8	2,22	405,88	182,83	423,913	16,694	4,068
		Просечна вредност/ Average					**506,29**					**406,544**	**17,420**	**3,259**

Табела 5. 12 Добиени вредности при испитување на јачина на свиткување на композитните плочи зајакнати со кепер ткаенина (примерок 2)

Table 5. 12 Obtained values from testing the bending strength of composite plates reinforced with twill fabric (sample 2)

Број на примерок/ Sample number			Ширина/ Width, **b (mm)**	Дебелина/ Thickness, **h (mm)**	Должина/ Length, **L (mm)**	Растојание/ Distance, **L_0 (mm)**	Јачина на свиткување/ Bending strength **Fmax (N)**	Поместување/ Displacement **S (mm)**	**ΔF**	**Δs**	$\frac{\Delta F}{\Delta s}$	Напрегање на свиткување/ Flexural strain, **σf (MPa)**	Модул на еластичност при свиткување/ Modulus of bending, **Ef (GPa)**	Деформација при свиткување/ Bending deformation, **εf (%)**
III-1	**10c/14B-MD**	**1-1**	15,46	2,63	60,43	40	887,29	3,41	2,24	765,99	341,96	497,847	19,454	3,363
		1-2	15,35	2,68	60,40	40	944,51	2,96	2,03	702,67	346,14	514,020	18,744	2,975
		1-3	15,42	2,60	60,13	40	903,32	3,41	1,77	596,62	337,07	519,950	19,899	3,325
		1-4	15,38	2,68	60,23	40	929,26	3,48	2,26	753,78	333,53	504,734	18,026	3,497
		1-5	15,45	2,85	60,48	40	894,16	3,27	1,66	608,83	366,77	427,512	16,408	3,495
		Просечна вредност/ Average					**911,708**					**492,813**	**18,506**	**3,331**
III-2	**10c/14B-CD**	**2-1**	15,44	2,55	60,11	40	704,95	4,42	1,61	471,5	292,86	421,291	18,302	4,227
		2-2	15,33	2,58	60,09	40	729,37	4,06	1,54	510,41	331,44	428,862	20,143	3,928
		2-3	15,16	2,54	60,06	40	658,41	4,26	1,76	499,73	283,94	403,907	18,287	4,058
		2-4	15,28	2,58	60,47	40	779,72	4,44	1,71	547,03	319,90	459,968	19,505	4,296
		2-5	15,15	2,59	60,21	40	740,05	4,79	1,71	521,85	305,18	436,918	18,551	4,652
		Просечна вредност/ Average					**722,50**					**430,189**	**18,958**	**4,232**
IV-3	**10c/18A-MD**	**3-1**	15,08	2,09	59,87	40	585,17	4,54	2,34	430,3	183,89	533,015	21,372	3,558
		3-2	15,44	2,10	60,01	40	621,79	4,68	2,33	431,82	185,33	547,910	20,738	3,686
		3-3	15,36	2,09	60,21	40	620,27	4,59	2,72	496,67	182,60	554,687	20,835	3,597
		3-4	15,22	2,05	60,12	40	586,70	5,65	2,33	437,93	187,95	550,358	22,935	4,343
		3-5	15,42	2,07	60,27	40	604,24	4,44	2,47	441,74	178,84	548,701	20,922	3,447
		Просечна вредност/ Average					**603,63**					**546,934**	**21,360**	**3,726**
IV-4	**10c/18A-CD**	**4-1**	15,00	2,07	60,30	40	537,87	4,72	1,73	325,78	188,31	502,107	22,646	3,664
		4-2	15,42	2,15	59,40	40	518,04	4,13	2,12	373,84	176,34	436,067	18,411	3,330
		4-3	15,39	2,13	59,86	40	598,14	5,21	2,16	382,23	176,96	513,992	19,038	4,161
		4-4	15,23	2,15	60,42	40	930,02	3,34	2,60	645,45	248,25	792,623	26,242	2,693
		4-5	15,43	2,09	60,02	40	479,89	4,36	1,93	327,3	169,59	427,203	19,262	3,417
		Просечна вредност/ Average					**612,79**					**534,399**	**21,120**	**3,453**

Табела 5. 13 Добиени вредности при испитување на јачина на свиткување на композитните плочи зајакнати со панама ткаенина (примерок 3)

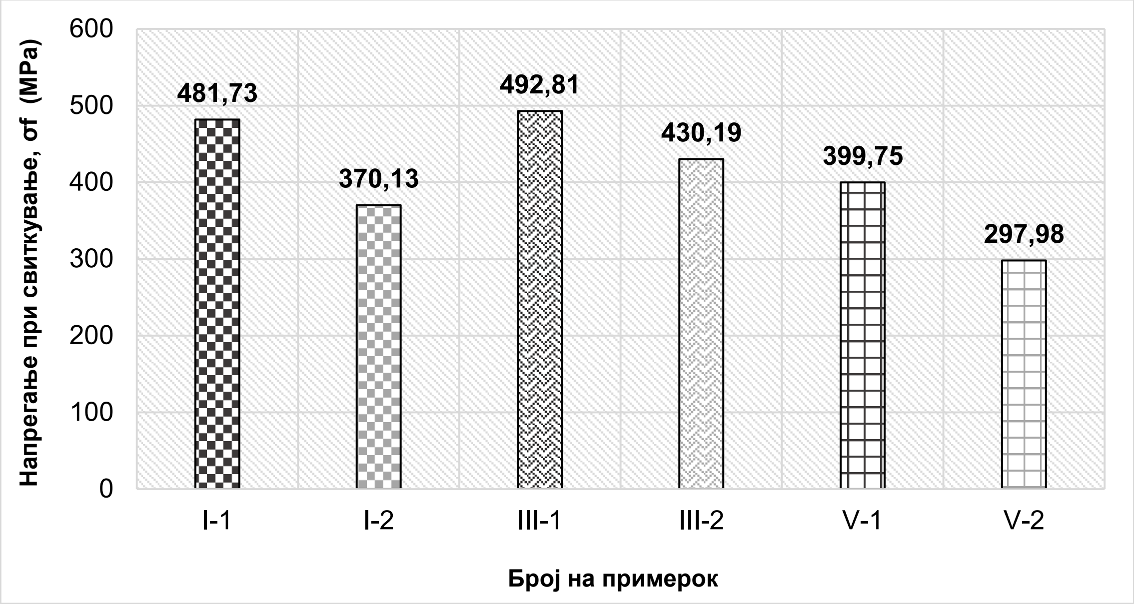
Table 5. 13 Obtained values from testing the bending strength of composite plates reinforced with basket fabric (sample 3)

Број на примерок/ Sample number			Ширина/ Width, **b (mm)**	Дебелина/ Thickness, **h (mm)**	Должина/ Length, **L (mm)**	Растојание/ Distance, **L_0 (mm)**	Јачина на свиткување/ Bending strength **Fmax (N)**	Поместување/ Displacement **S (mm)**	**ΔF**	**Δs**	$\frac{\Delta F}{\Delta s}$	Напрегање на свиткување/ Flexural strain, **σf (MPa)**	Модул на еластичност при свиткување/ Modulus of bending, **Ef (GPa)**	Деформација при свиткување/ Bending deformation, **εf (%)**
V-1	**10c/14B-MD**	**1-1**	15,43	2,94	60,27	40	641,63	3,03	2,03	492,10	242,41	288,653	9,892	3,341
		1-2	15,41	2,92	60,29	40	955,96	3,62	1,48	699,61	472,71	436,539	19,713	3,964
		1-3	15,23	2,91	60,48	40	849,15	3,18	2,28	665,28	291,79	395,049	12,440	3,470
		1-4	15,30	2,91	60,29	40	933,83	3,74	1,56	708,77	454,34	432,456	19,281	4,081
		1-5	15,34	2,94	60,40	40	985,72	3,31	3,01	878,14	291,74	446,050	11,974	3,649
		Просечна вредност/ Average					**873,26**					**399,749**	**14,660**	**3,701**
V-2	**10c/14B-CD**	**2-1**	15,53	2,87	60,48	40	640,87	2,98	1,51	551,61	365,30	300,598	15,921	3,207
		2-2	15,30	2,93	60,38	40	654,6	3,39	1,03	347,9	337,77	299,020	14,042	3,725
		2-3	15,40	2,90	60,56	40	659,18	4,05	1,19	452,42	380,18	305,379	16,196	4,404
		2-4	15,42	2,91	60,23	40	641,63	3,83	1,34	451,66	337,06	294,826	14,193	4,179
		2-5	15,46	2,93	60,38	40	641,63	3,41	2,05	506,59	247,12	290,062	10,167	3,747
		Просечна вредност/ Average					**647,58**					**297,98**	**14,10**	**3,85**
VI-3	**10c/18A-MD**	**3-1**	15,38	2,71	60,34	40	924,68	3,86	3,08	804,14	261,08	491,189	13,647	3,923
		3-2	15,40	2,72	60,31	40	888,82	3,43	2,33	674,44	289,46	468,068	14,944	3,499
		3-3	15,30	2,80	60,40	40	880,43	3,78	2,70	737,00	272,96	440,392	13,003	3,969
		3-4	15,31	2,76	60,29	40	930,02	3,57	2,68	746,15	278,41	478,467	13,839	3,695
		3-5	15,33	2,75	60,59	40	900,27	3,67	2,63	775,15	294,73	465,925	14,791	3,785
		Просечна вредност/ Average					**904,85**					**468,808**	**14,045**	**3,774**
VI-4	**10c/18A-CD**	**4-1**	15,35	2,79	59,83	40	621,03	3,54	1,42	491,33	346,01	311,852	16,607	3,704
		4-2	15,45	2,82	60,39	40	625,61	2,87	1,64	377,66	230,28	305,512	10,634	3,035
		4-3	15,37	2,74	60,29	40	667,57	4,28	2,12	522,61	246,51	347,116	12,475	4,398
		4-4	15,33	2,76	60,46	40	664,52	3,59	2,28	514,98	225,87	341,428	11,213	3,716
		4-5	15,37	2,78	60,37	40	717,16	3,82	2,27	553,13	243,67	362,248	11,806	3,982
		Просечна вредност/ Average					**659,18**					**333,63**	**12,547**	**3,767**

Дополнително средната вредност за напрегањето на свиткување, деформацијата и модулот на еластичност беше пресметан за секоја група на композитни примероци и врз основа на добиените резултати беше определено генералното однесување на тестираните примероци (таб. 5. 14). На Слика 5. 24 и Слика 5. 25 дадена е компаративна анализа на јачината на свиткување на композитните плочи зајакнати со различни видови на ткаенина, добиени со пресување при притисок од 30 и 40 bar.

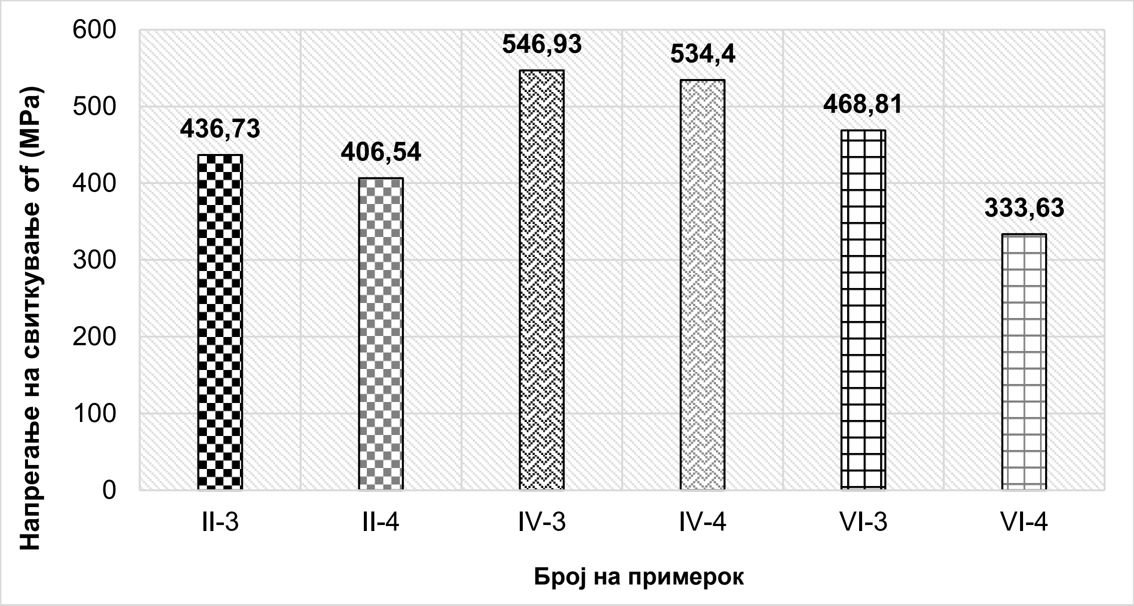
Табела 5. 14 Добиени средни вредности при испитување на јачина на свиткување на композитните плочи зајакнати со стаклена ткаенина
Table 5. 14 Average values obtained for the bending strength test for composite plates reinforced with glass fabric

Број на примерок/ Sample number			Јачина на свиткување/ Bending strength F_{max} (N)	Напрегање на свиткување/ Bending strain σ_f (MPa)	Деформација при свиткување/ Bending deformation ε_f (%)	Модул на еластичност при свиткување/ Modulus of bending E_f (GPa)
Примерок 1/ Sample 1	I-1	10c/14B-MD	**622,71**	**481,731**	**3,562**	**21,342**
	I-2	10c/14B-CD	**517,73**	**370,128**	**3,609**	**16,412**
	II-3	10c/18A-MD	**543,364**	**436,733**	**2,265**	**20,832**
	II-4	10c/18A-CD	**506,286**	**406,544**	**3,259**	**17,420**
Примерок 2/ Sample 2	III-1	10c/14B-MD	**911,708**	**492,813**	**3,331**	**18,506**
	III-2	10c/14B-CD	**722,50**	**430,189**	**4,232**	**18,958**
	IV-3	10c/18A-MD	**603,63**	**546,934**	**3,726**	**21,360**
	IV-4	10c/18A-CD	**612,79**	**534,399**	**3,453**	**21,120**
Примерок 3/ Sample 3	V-1	10c/14B-MD	**873,26**	**399,749**	**3,701**	**14,660**
	V-2	10c/14B-CD	**647,58**	**297,98**	**3,850**	**14,100**
	VI-3	10c/18A-MD	**904,85**	**468,808**	**3,774**	**14,045**
	VI-4	10c/18A-CD	**659,18**	**333,63**	**3,767**	**12,547**



Слика 5. 24 Напрегање при свиткување на композитни плочи зајакнати со текстил добиени при притисок од 30 bar

Figure 5. 24 Flexural strain of composite plates reinforced with textiles obtained at a pressure of 30 bar



Слика 5. 25 Напрегање при свиткување на композитни плочи зајакнати со текстил добиени при притисок од 40 bar

Figure 5. 25 Flexural strain of composite plates reinforced with textiles obtained at a pressure of 40 bar

Врз основа на добиените резултати (таб. 5. 14 и сл. 5. 24, сл. 5. 25) може да се констатира дека кај сите композитни плочи, вредностите добиени за јачината на свиткување кај примероците во надолжна насока (MD - правец на машината) се поголеми од соодветните вредности во напречна насока (CD - спротивно од правецот на машината). Ова е и очекувано, бидејќи во надолжна насока силите на свиткување дејствуваат во насока на основата, а добиените резултати од извршените тестирања покажаа дека сите применети Е - стаклени ткаенини имаат поголема густина и јачина на истегнување во правец на основата. Пресметаните вредности за деформацијата на свиткување се движат помеѓу 2,26 % и 4,23 %, додека просечната вредност за модулот на еластичност при свиткување има вредност помеѓу 12,54 GPa и 21,36 GPa за примерок VI-3 и IV-3 соодветно (таб. 5. 14).

Тест примероците од композитните плочи зајакнати со кепер ткаенина добиени со пресување при притисок од 30 и 40 bar, покажаа највисока отпорност на силите на свиткување во двете насоки (MD и CD) и значително високи вредности за модулот на еластичност при свиткување.

Композитните плочи зајакнати со платно ткаенина добиени со пресување при притисок од 30 bar покажаа незначително помала јачина на свиткување во надолжна насока (MD) во однос на композитните плочи зајакнати со кепер ткаенина, но за 18 % поголема јачина на свиткување во однос на композитните плочи зајакнати со панама ткаенина. Јачината на свиткување во напречна насока (CD) е за 14 % помала во однос на јачината на свиткување на композитните примероци зајакнати со кепер ткаенина и за околу 20 % поголема во однос на јачината на свиткување на композитните плочи зајакнати со панама ткаенина. Исто така, композитните плочи зајакнати со истата ткаенина, но пресувани при поголем притисок од 40 bar, покажаа помала јачина и незначително помали вредности за модулот на еластичност при свиткување во двете насоки, во однос на композитните плочи зајакнати со кепер ткаенина. Помалата јачина на свиткување кај примероците зајканати со платно ткаенина може да е резултат и на релативно високиот процент на пори забележан кај овие примероци (I - 2,56 %, II – 4,93 %), кој има значително влијание врз механичките својства.

Најмала јачина и најмал модул на еластичност при свиткување, во надолжна и напречна насока покажаа тест примероците од композитните плочи (V-1 и V-2) зајакнати со панама ткаенина. Причината за ова, покрај малата јачина на панама ткаенината, исто така може да е и релативно високиот процент на пори (3,68 %).

Со примена на поголем притисок на пресување (40 bar) речиси сите композитни примероци покажаа поголеми јачини на свиткување во надолжна и напречна насока. Единствено, тест примероците од композитната плоча зајакната со платно ткаенина покажаа помала јачина на свиткување во надолжна насока во однос на примероците од композитната плоча добиена при помал притисок на пресување (30 bar).

Врз основа на добиените експериментални резултати може да се заклучи дека јачината и модулот на еластичност при свиткување кај композитните примероци зајакнати со Е - стаклени ткаенини се поголеми во лонгитудинална насока во споредба со аксијалната насока. Од овие резултати јасно е дека типот на стаклена ткаенина и ориентацијата на влакната како производни параметри директно влијаат врз својствата на свиткување на композитните плочи. Произведените композитни плочи зајакнати со платно ткаенина покажаа релативно високи вредности за јачината на свиткување, иако кај овие примероци е забележан релативно висок процент на пори. Добиените вредности за јачината на свиткување се споредливи во однос на вредностите за јачината на свиткување за композитни плочи зајакнати со платно ткаенина кај кои за добивање на препрегот се користи машинска импрегнација (Mijajlovikj et al., 2017).

5.2.5 Испитување на својствата на полимерните композити плочи зајакнати со Е – стаклен неткаен текстил (Testing the properties of polymer composite plates reinforcement with E-glass nonwoven textile)

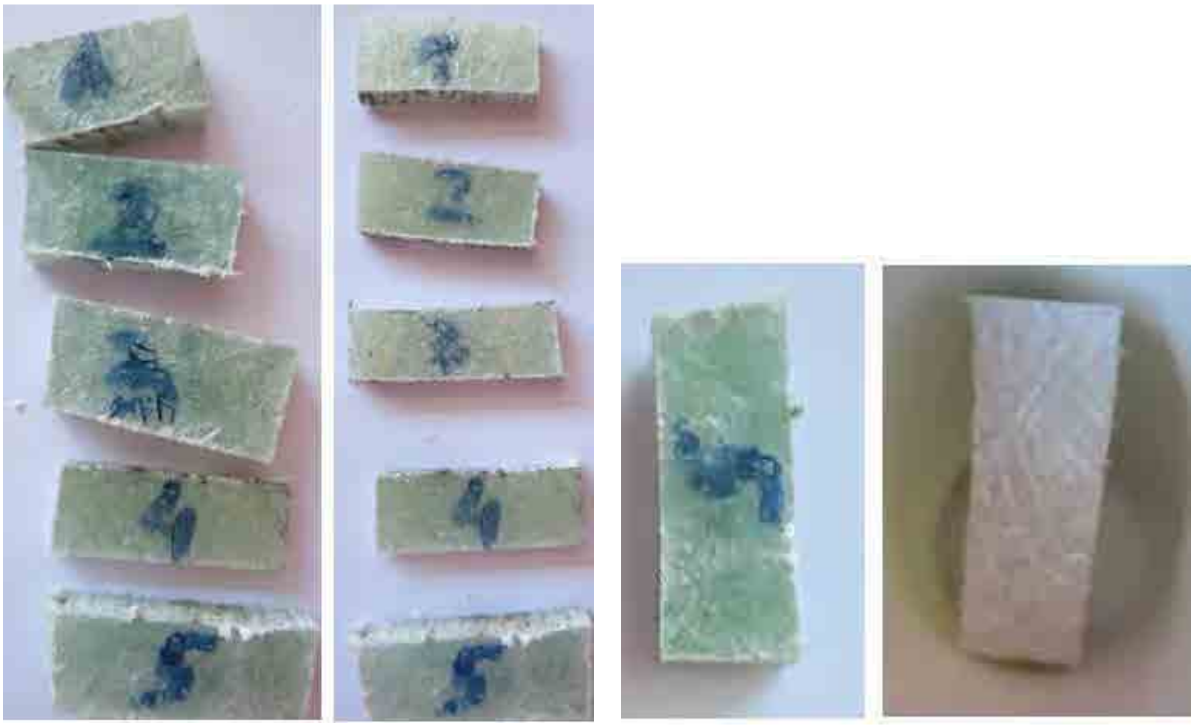
5.2.5.1 Определување на содржината на составните компоненти во композитните примероци (Determination of the content of the constituent components in the composite samples)

Во Табела 5. 15 се претставени димензиите, експериментално измерената маса и пресметаните вредностите за површинската маса на примероците од Е – стаклен неткаен текстил (стаклен мат). Добиените резултати претставуваат средна вредност од 5 мерења на електронска вага при стандардни услови.

Табела 5. 15 Површинска маса на Е – стаклен неткаен текстил
Table 5. 15 Surface mass of E-glass nonwoven textile

Број на примерок/ Sample number		Ширина/ Width, a (m)	Должина/ Length, b (m)	Плоштина/ Surface P (m^2)	Измерена тежина/ Measured weight, (g)	Површинска маса/ Surface mass, (g/m^2)	Теоретска повр. маса/ Theoret. surface mass, (g/m^2)
Примерок 4/ Sample 4	4-1	0,102	0,100	0,0102	3,341	327,549	300 +/-25 g/m^2
	4-2	0,100	0,100	0,0100	3,275	327,500	
	4-3	0,102	0,100	0,0102	3,311	324,608	
	4-4	0,102	0,100	0,0102	3,315	325,000	
	4-5	0,101	0,100	0,0101	3,274	324,158	
Просечна вредност/ Average					**3,303**	**325,763**	

Содржината на конституентите во композитните примероци зајакнати со стаклен мат е определена според стандардот ASTM D3171 (ASTM D3171, 2015). Изгледот на композитните примероци пред и после процесот на горење е претставен на Слика 5. 26. Во Табела 5.16 се претставени резултатите од испитаните масени и волуменски удели на Е - теклениот мат и епоксидната смола, вредностите за теоретската и експерименталната густина како и пресметаниот процент на пори во добиените композитни примероци. Индивидуалните густини на конституентите се земани како готови вредности и при пресметките земена е густина на стаклените влакна од 2,56 g/cm^3 и густина на епоксидната смола од 1,10 g/cm^3.



а) б)

а)

б)

Слика 5. 26 Изглед на примероците пред и после процесот на горење а) Стаклен мат/ епоксид пресуван при 30 bar б) Стаклен мат/ епоксид пресуван при 40 bar

Figure 5. 26 Appearance of samples before and after the burning process a) Glass mat/ epoxy pressed at 30 bar; b) Glass mat/ epoxy pressed at 40 bar

Табела 5. 16 Масени и волуменски удели на составните компоненти, теоретска, експериментална густина и процент на пори во композитните примероци зајакнати со Е – стаклен неткаен текстил

Table 5. 16 Mass and volume ratio of components, theoretical, experimental density and percentage of voids in composite samples reinforcment with E-glass nonwoven textile

Број на пример./ Sample number		Маса пред горење/ Mass before burning, M_i (g)	Маса по горење/ Mass after burning, M_f (g)	Маса на смола/ Mass of resin, m_m (g)	Маса на ткаенина/ Mass of reinforc., m_f (g)	Масен удел на смола/ Mass ratio of resin, W_m (%)	Просечна вредност, W_m/ Average value W_m (%)	Масен удел на ткаенина/ Mass ratio of reinforc, W_f (%)	Просечна вредност, W_f/ Average value, W_f (%)
VII	1	2,5795	1,2196	1,3599	1,2196	52,72	**53,79**	47,28	**46,21**
	2	3,0329	1,4025	1,6304	1,4025	53,76		46,24	
	3	3,7457	1,6903	2,0554	1,6903	54,87		45,13	
	4	3,4131	1,5598	1,8533	1,5598	54,30		45,70	
	5	2,5700	1,2000	1,3700	1,2000	53,31		46,69	
VIII	1	1,8000	1,1243	0,6757	1,1243	37,54	**39,22**	62,46	**60,78**
	2	1,7815	1,1018	0,6797	1,1018	38,15		61,85	
	3	1,8360	1,1157	0,7203	1,1157	39,23		60,77	
	4	1,8598	1,0800	0,7798	1,0800	41,93		58,07	
	5	1,8100	1,1000	0,7100	1,1000	39,23		60,77	

Број на пример./ Sample number		Густина на смола / Density of resin, ρ_m (g/cm^3)	Густина на зајакнув./ Density of reinforc., ρ_f (g/cm^3)	Експерим густина/ Experim. density, M_d (g/cm^3)	Волу. удел на смола / Volume of resin, V_m (%)	Просе. вр. V_m / Average value V_m (%)	Волу. удел на зајакнув./ Volume of reinforc., V_f (%)	Просе. вр. V_f/ Average value V_f (%)	Теорет. густина/ Theoret. density, T_d	Процент на пори/ Percentage of voids, (%)	Просе. вр. на пори / Average value of voids, (%)
VII	1	1,1	2,56	1,4212	68,11	**67,83**	26,25	**25,05**	1,5061	5,6375	**7,12**
	2	1,1	2,56	1,3872	67,79		25,06		1,4940	7,1475	
	3	1,1	2,56	1,3621	67,95		24,01		1,4812	8,0429	
	4	1,1	2,56	1,3507	66,67		24,11		1,4878	9,2159	
	5	1,1	2,56	1,4160	68,62		25,83		1,4992	5,5535	
VIII	1	1,1	2,56	1,6187	55,24	**58,41**	39,49	**38,87**	1,7087	5,2651	**5,28**
	2	1,1	2,56	1,5384	53,36		37,17		1,6994	9,4733	
	3	1,1	2,56	1,5855	56,55		37,64		1,6834	5,8171	
	4	1,1	2,56	1,6357	62,35		37,10		1,6447	0,5467	
	5	1,1	2,56	1,8100	64,55		42,97		1,6835	-7,5142	

Од добиените резултати за содржина на конституентите во композитните примероци зајакнати со Е - стаклен неткаен текстил може да е заклучи дека тест примероците (VIII) пресувани при поголем притисок од 40 bar, имаат подобра содржина на стаклен неткаен текстил/ епоксидна смола (60,78 %/ 39,22 %), во однос на тест примероците од композитните плочи (VII) пресувани при помал притисок од 30 bar. Кај тест примероците (VII), масениот удел на смолата (53,79 %) е поголем во однос на масениот удел на зајакнувачката компонента (46,21 %), а исто така, овие композитни примероци имаат и поголема дебелина (6,7 - 7,10 mm). Тоа укажува на поголема натопеност на зајакнувачката компонента со епоксидната смола, а при повисоки притисоци вишокот на смола се истиснува што резултира во помал масен удел на смолата и помала дебелина на примероците.

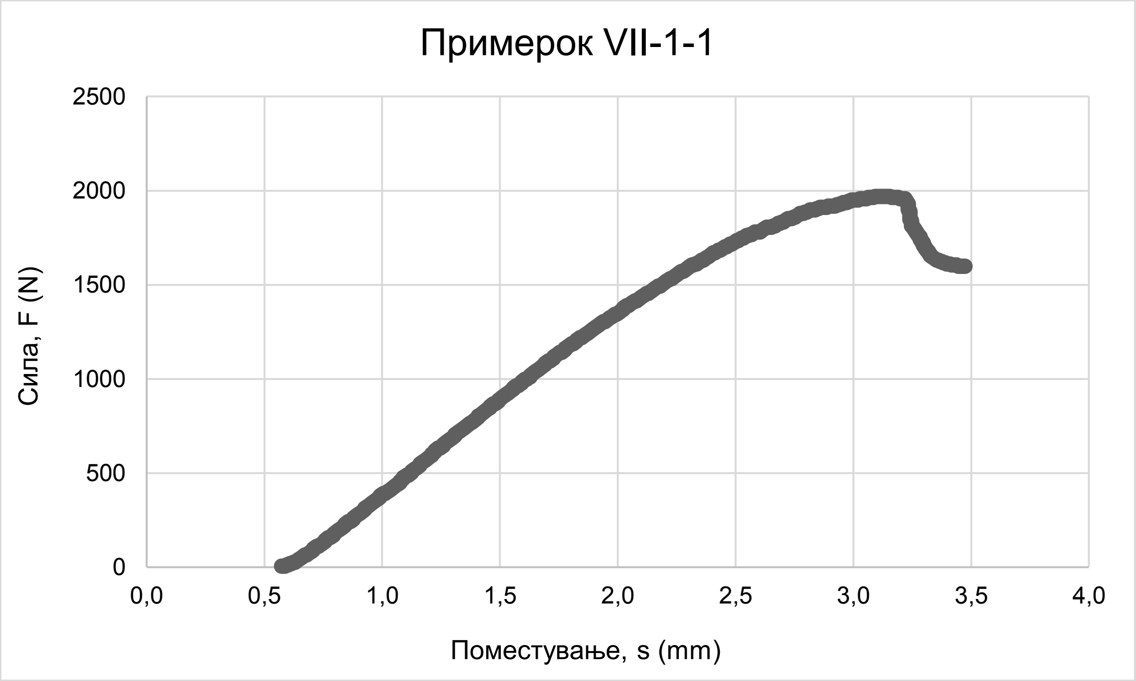
Добиените резултати за содржината на пори покажуваат дека и двата типа на композитни структури зајакнати со стаклен мат (VII и VIII) имаат многу повисок процент на пори (5,28 и 7,12 %) во однос на композитните примероци зајакнати со стаклена ткаенина (I, II, III, IV, V и VI).

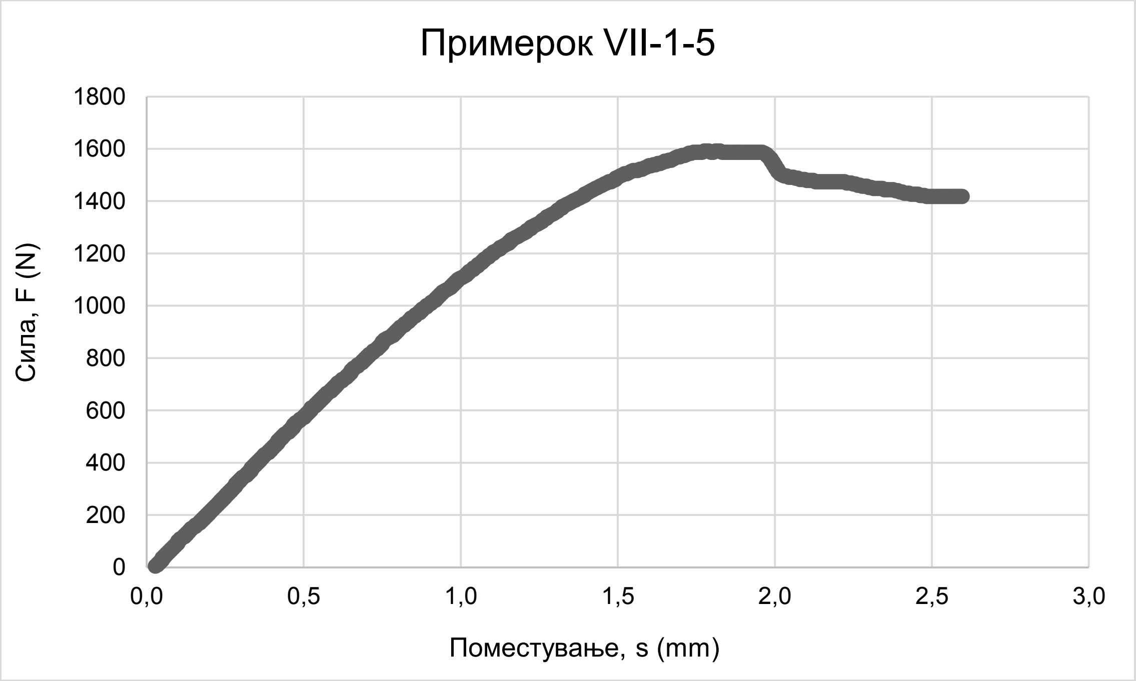
5.2.5.2 Јачина на свиткување и модул на еластичност при свиткување (Flexural strength and modulus of elasticity in flexure)

Јачината на свиткување и модулот на еластичност при свиткување за композитните структури зајакнати со Е - стаклен неткаен текстил (стаклен мат) се испитувани според методот со три точки на свиткување (EN ISO 14125, 1998). На Слика 5. 27 - Слика 5. 30 се претставени кривите сила - поместување за дел од композитните примероци зајакнати со стаклен мат. Вакви дијаграми како што се прикажани на Слика 5. 27 - Слика 5. 30 се добиени за сите тестирани примероци и се дадени во прилог 10.10 - 10.11. Сите добиени криви имаат сличен облик, односно линерно растат до одредена максимална сила на свиткување, а потоа со попуштање на одредени слоеви од композитната структура, кривата постепено опаѓа се до целосно деструкција на тест примероците.

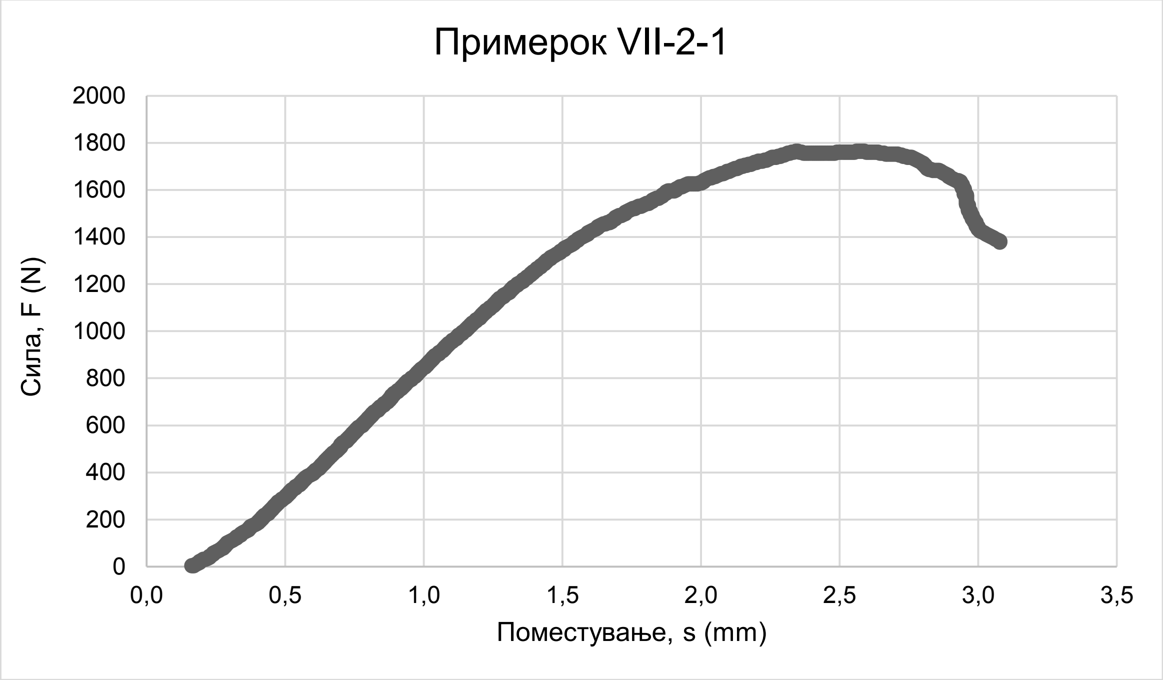
Врз основа на добиените дијаграми и со помош на равенките 4.10, 4.11 и 4.12 се пресметани напрегањето на свиткување, деформацијата и модулот на еластичност при свиткување (таб. 5. 17). На Слика 5. 31 се претставени

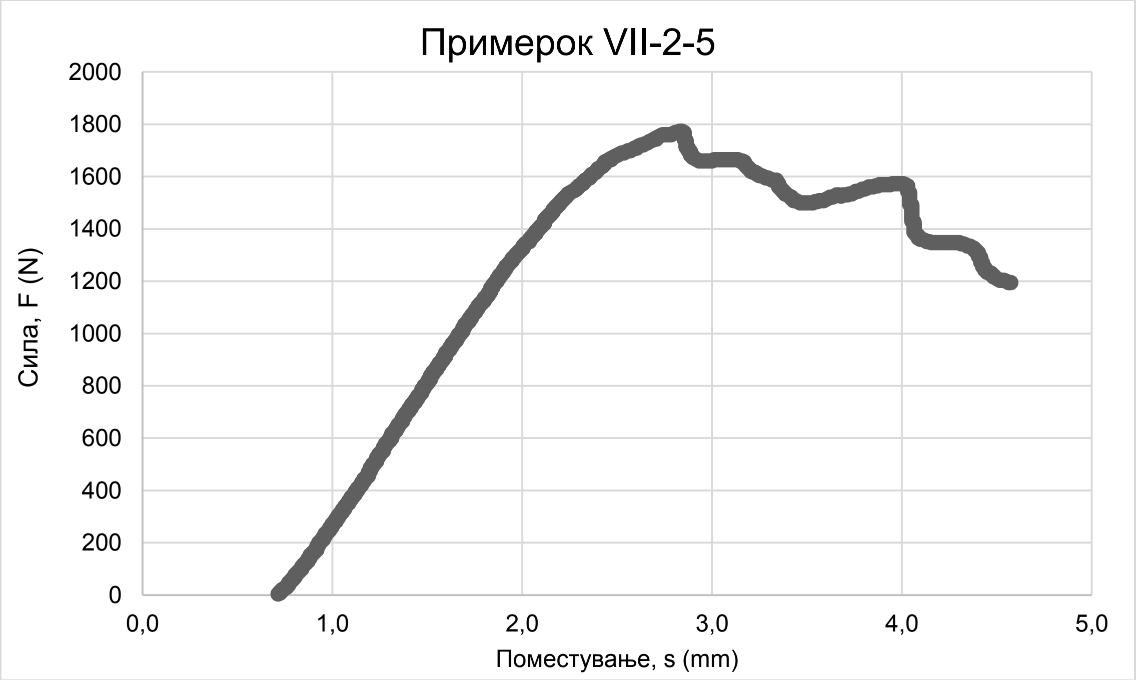
просечните вредности за јачината на свиткување на композитните примероци зајакнати со Е – стаклен неткаен текстил.



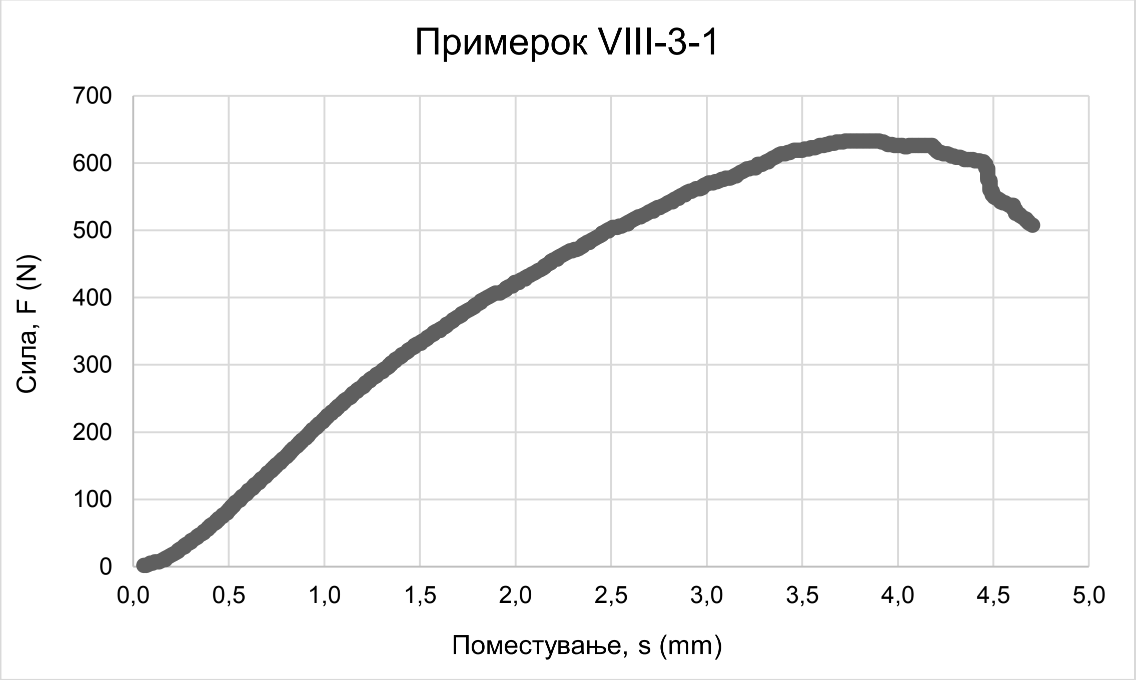


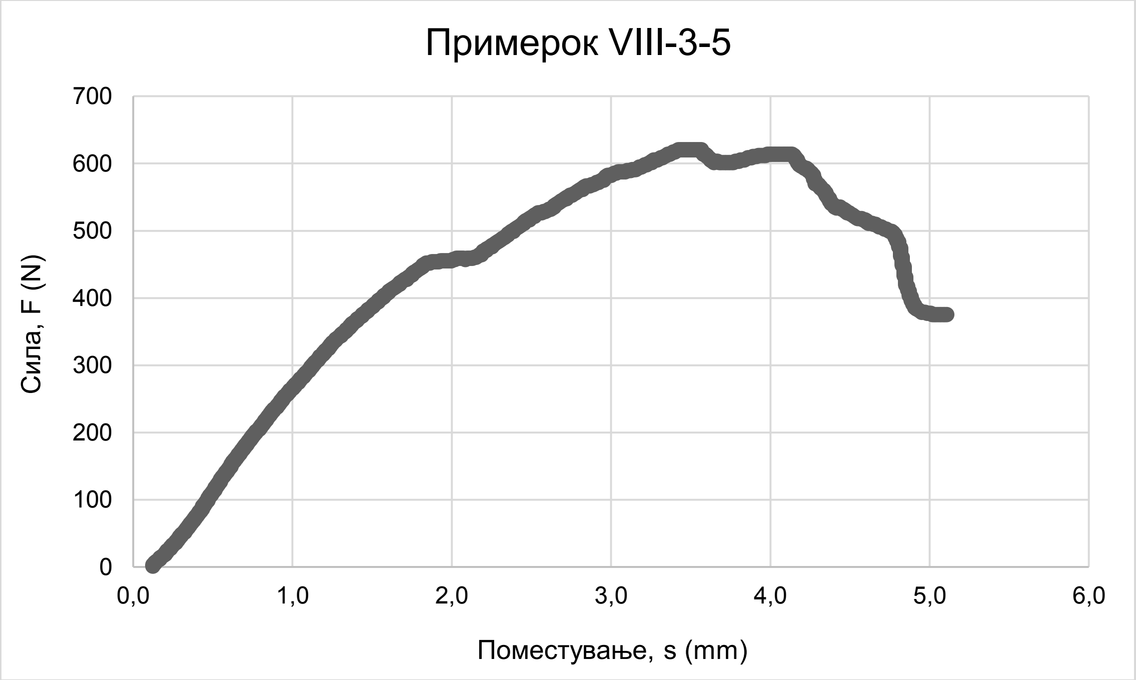
Слика 5. 27 Криви сила– поместување за тест примероците VII-1-1 и VII-1-5
Figure 5. 27 Force and displacement graphs for test samples VII-1-1 and VII-1-5



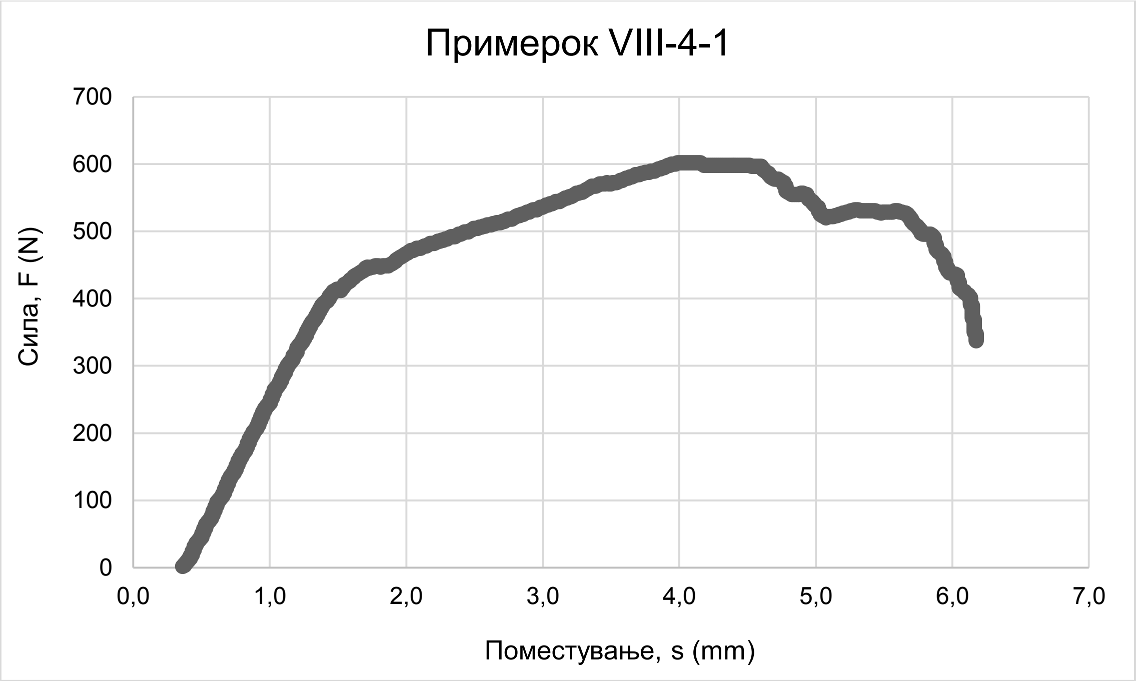


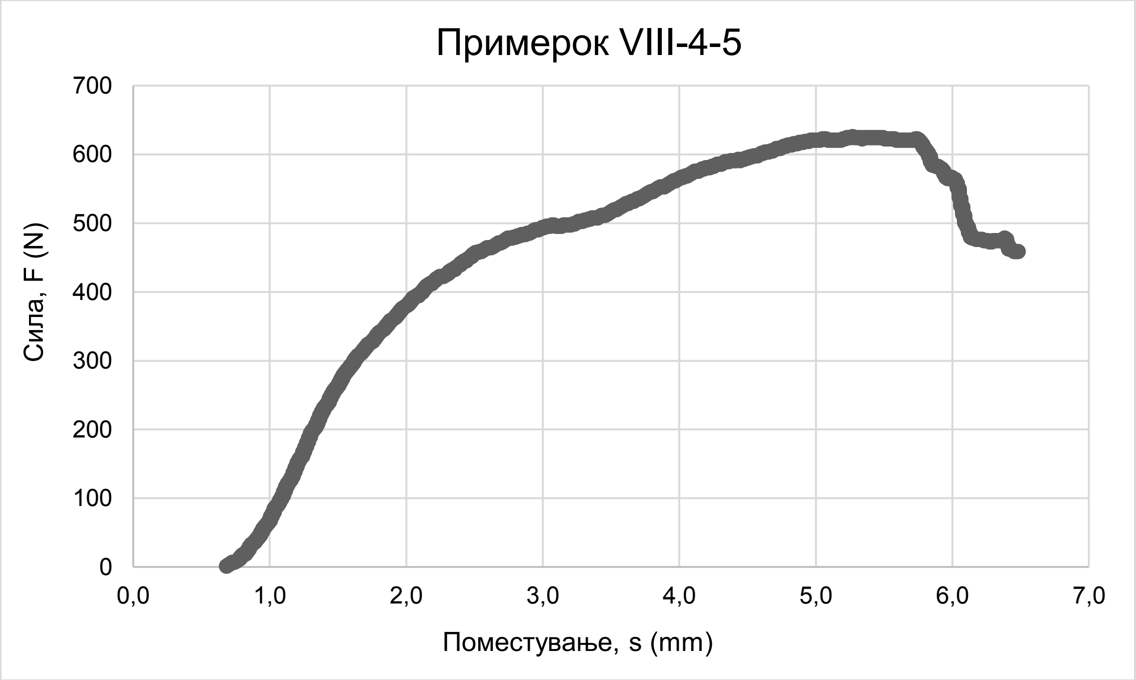
Слика 5. 28 Криви сила– поместување за тест примероците VII-2-1 и VII-2-5
Figure 5. 28 Force and displacement graphs for test samples VII-2-1 and VII-2-5





Слика 5. 29 Криви сила– поместување за тест примероците VIII-3-1 и VIII-3-5
Figure 5. 29 Force and displacement graphs for test samples VIII-3-1 and VIII-3-5



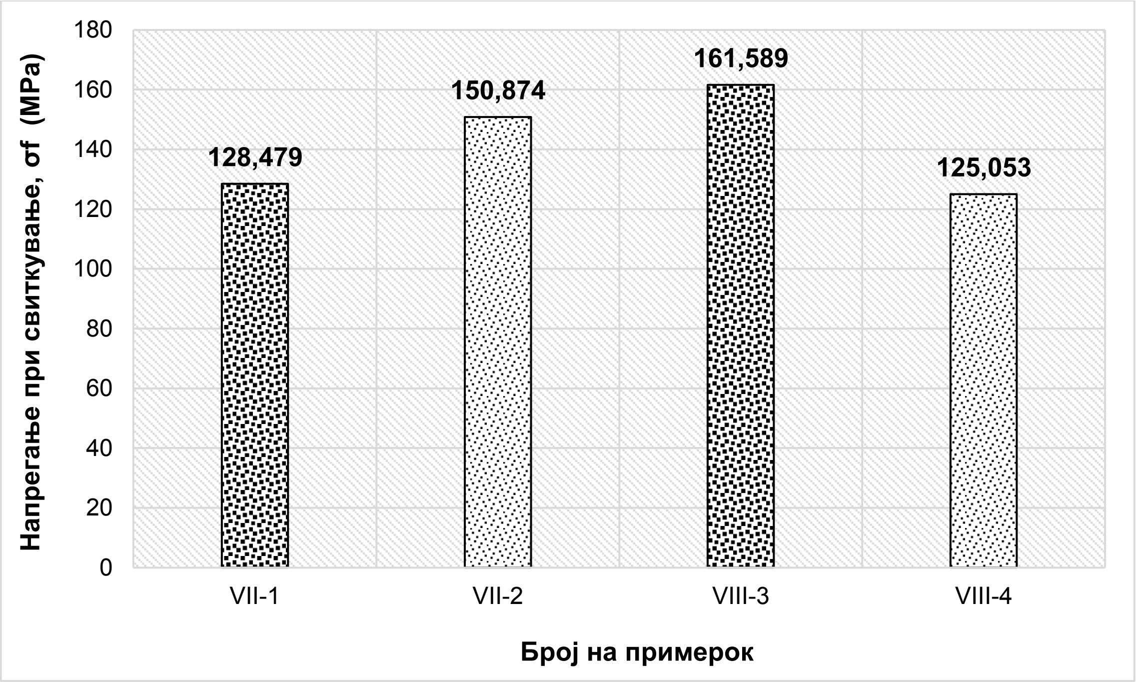


Слика 5. 30 Криви сила– поместување за тест примероците VIII-4-1 и VIII-4-5
Figure 5. 30 Force and displacement graphs for test samples VIII-4-1 and VIII-4-5

Табела 5. 17 Јачина на свиткување на композитните плочи зајакнати со Е - стаклен неткаен текстил

Table 5. 17 Bending strength of composite plates reinforced with E - glass nonwoven textile

Број на примерок/ Sample number			Ширина/ Width, **b (mm)**	Дебелина/ Thickness, **h (mm)**	Должина/ Length, **L (mm)**	Растојание/ Distance, **L_0 (mm)**	Јачина на свиткување/ Bending strength **Fmax (N)**	Поместување/ Displacement **S (mm)**	**ΔF**	**Δs**	$\frac{\Delta F}{\Delta s}$	Напрегање на свиткување/ Flexural strain, **σf (MPa)**	Модул на еластичност при свиткување/ Modulus of bending, **Ef (GPa)**	Деформација при свиткување/ Bending deformation, **εf (%)**
VII-1	**8c/14B-MD**	1-1	15,19	7,10	60,62	40	1969,57	2,52	1454,35	1,56	932,28	154,329	2,744	6,710
		1-2	15,18	7,00	60,28	40	1652,17	2,2	1256,52	1,44	872,58	133,272	2,681	5,775
		1-3	15,16	7,30	60,37	40	1852,17	2,7	1647,83	1,68	980,85	137,558	2,661	7,391
		1-4	15,11	7,20	60,33	40	1102,17	2,47	600	0,59	1016,95	84,425	2,885	6,669
		1-5	15,10	6,90	60,49	40	1591,30	1,75	1000	0,87	1149,43	132,809	3,707	4,528
		Просечна вредност/ Average					**1633,48**					**128,479**	**2,936**	**6,215**
VII-2	**8c/14B-CD**	2-1	15,60	6,70	60,30	40	1765,22	2,18	1360,90	1,37	993,36	151,243	3,387	5,475
		2-2	15,57	7,00	60,56	40	1943,48	2,36	1650,00	1,72	959.30	152,843	2,874	6,169
		2-3	15,56	6,60	60,40	40	1760,87	2,16	1363,04	1,36	1002,24	155,877	3,585	5,346
		2-4	15,57	6,60	60,43	40	1604,35	2,93	1226,09	1,38	888,47	141,930	3,176	7,252
		2-5	15,55	6,70	60,41	40	1773,91	2,12	1491,30	1,48	1007,64	152,476	3,447	5,327
		Просечна вредност/ Average					**1769,57**					**150,874**	**3,294**	**5,914**
VIII-3	**8c/18A-MD**	3-1	15,10	4,10	60,28	40	633,04	3,67	408,7	1,88	217,39	149,637	3,342	5,643
		3-2	15,40	4,60	60,10	40	685,22	3,96	333,92	0,99	337,29	126,167	3,600	6,831
		3-3	15,50	3,80	60,33	40	674,78	4,15	285,22	0,84	339,55	180,890	6,388	5,914
		3-4	15,20	3,70	60,30	40	629,57	3,98	246,96	0,81	304,89	181,530	6,336	5,522
		3-5	15,20	3,80	60,28	40	629,87	3,30	278,26	0,93	299,20	169,723	5,740	4,703
		Просечна вредност/ Average					**648,70**					**161,589**	**5,081**	**5,771**
VIII-4	**8c/18A-CD**	4-1	15,60	5,00	60,18	40	601,74	3,62	401,74	1,07	375,46	92,575	3,081	6,788
		4-2	15,50	4,60	60,41	40	702,61	4,15	420,87	1,08	389,69	128,534	4,133	7,159
		4-3	15,50	4,20	60,23	40	697,39	4,70	419,13	1,52	275,74	153,037	3,842	7,403
		4-4	15,50	4,00	60,35	40	608,70	3,94	339,13	1,08	314,01	147,266	5,065	5,910
		4-5	15,70	4,80	60,27	40	626,09	4,58	290,43	0,91	319,15	103,850	2,941	8,244
		Просечна вредност/ Average					**647,31**					**125,053**	**3,812**	**7,101**



Слика 5. 31 Напрегање при свиткување на композитните плочи зајакнати со Е-стаклен неткаен текстил добиени при притисок од 30 и 40 bar
Figure 5. 31 Flexural strain of the composite plates reinforced with E - glass nonwoven textile obtained at pressures of 30 and 40 bar

Врз основа на експериментално добиените вредности за јачината и модулот на свиткување на композитните примероци зајакнати со стаклен мат (таб. 5. 17 и сл. 5. 31) може да се заклучи дека овие тест примероци имаат приближно иста отпорност на силите на свиткување во надолжна и напречна насока. Тоа се должи на безредно поставени влакна во различни насоки во стаклениот мат што резултира на добивање на приближни вредности за јачините на композитните примероци во двете насоки. Во однос на композитните примероци зајакнати со стаклена ткаенина овие тест примероци покажаа значително пониски вредности за јачината и модулот на еластичност при свиткување (> 50 %). Ова се должи на разликите во структурата на применетата зајакнувачка компонента, односно зајакнувачките влакна немаат континуирана должина и се хаотично распределени во стаклениот мат.

Споредувајќи ги класичните постапки на производство на ткаенините со постапките за производство на неткаен текстил, можеме да констатираме дека тие во принцип се разликуваат. Класичните постапки за добивање на ткаенини се заснoваат исклучиво на преработката на предено. Влакната, тука, меѓу себе

се држат само со механичко поврзување и тоа со разни постапки на предење и ткаење. Неткаените текстилни материјали пак по структура се разни комбинации на насочени влакна, а истите не се зацврстени по класичните начини на ткаење и плетење, односно заедно се зацврстени со врзување и тоа со помош на средства за врзување, односно по механички, термички и хемиски начин на врзување. Бидејќи кај Е – стаклениот мат, влакната се меѓусебно случајно распоредени едни во однос на други низ целата површина поврзани со хемиско врзивно средство, оптоварувањето се распоредува низ целата површина што резултира со приближно иста јачина на свиткување во двете насоки.

5.2.6 Испитување на својствата на полимерните композити плочи зајакнати со УД ленти (Testing the properties of polymer composite plates reinforcement with UD structure)

5.2.6.1 Определување на содржината на составните компоненти во композитните примероци (Determination of the content of the constituent components in the composite samples)

Содржината на конституентите во композитните примероци зајакнати со готов унидирекционален стаклен препрег е детерминирана според барањата на стандардот ASTM D3171 (ASTMD3171, 2015). Добиените резултати од испитаните масени и волуменски удели на зајакнувачката компонента и епоксидната смола, вредностите за теоретската и експерименталната густина како и пресметаниот процент на пори во добиените композитни примероци се дадени во Табела 5. 18 .

Од добиените резултати за содржина на конституентите во композитните примероци претставени во Табела 5. 18 може да се заклучи дека има многу добра содржина на зајакнувачка компонента во добиените композитни примероци и добра содржина на епоксидна смола. Масениот удел на зајакнувачката компонента се движи од 68 - 77 %, додека епоксидната смола е застапена со 23 - 32 %. Композитните примероци (X) пресувани при поголем притисок од 40 bar, имаат поголема содржина на зајакнувачка компонента (76 %) и помал процент на пори (2,46 %) во однос на тест примероците од композитните плочи (VIII) пресувани при помал притисок од 30 bar. Оваа значи дека овие структури ќе резултираат во материјал со подобри механички карактеристики.

Табела 5. 18 Масени и волуменски удели на составните компоненти, теоретска, експериментална густина и процент на пори во композитните примероци зајакнати со унидирекционални ленти

Table 5. 18 Mass and volume ratio of components, theoretical, experimental density and percentage of voids in composite samples reinforcment with UD structure

Број на пример. / Sample number		Маса пред горење/ Mass before burning, M_i (g)	Маса по горење/ Mass after burning, M_f (g)	Маса на смола/ Mass of resin, m_m (g)	Маса на ткаенина/ Mass of reinforc., m_f (g)	Масен удел на смола/ Mass ratio of resin, W_m (%)	Просечна вредност, W_m/ Average value W_m (%)	Масен удел на ткаенина/ Mass ratio of reinforc, W_f (%)	Просечна вредност, W_f/ Average value, W_f (%)
	1	6,664	4,5177	2,1463	4,5177	32,21		67,79	
	2	6,7368	4,9278	1,8090	4,9278	26,85		73,15	
IX	3	6,7368	4,9278	1,8090	4,9278	26,85	**27,36**	73,15	**72,64**
	4	7,875	5,9831	1,8919	5,9831	24,02		75,98	
	5	6,7368	4,9278	1,8090	4,9278	26,85		73,15	
	1	8,1888	6,1788	2,0100	6,1788	24,55		75,45	
	2	7,6831	5,9831	1,7000	5,9831	22,13		77,87	
X	3	8,0980	6,1788	1,9192	6,1788	23,70	**23,90**	76,30	**76,10**
	4	7,875	5,9831	1,8919	5,9831	24,02		75,98	
	5	7,9876	5,9831	2,0045	5,9831	25,10		74,90	

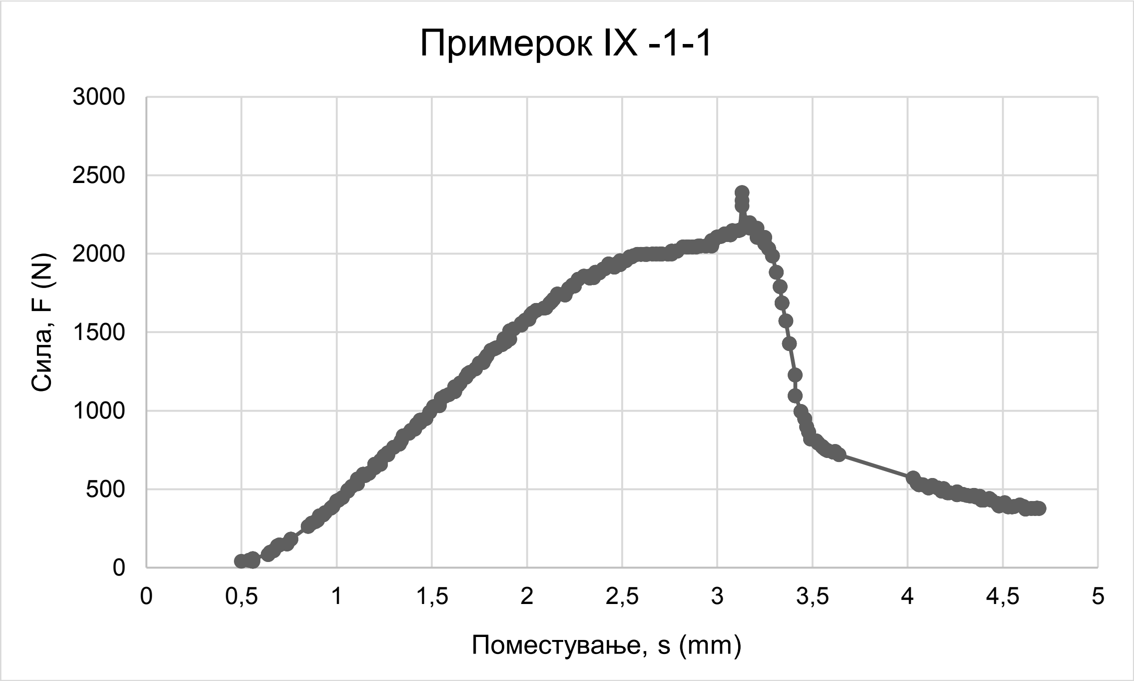
Број на пример. / Sample number		Густина на смола / Density of resin, ρ_m (g/cm^3)	Густина на зајакнув./ Density of reinforc., ρ_f (g/cm^3)	Експерим густина/ Experim. density, M_d, (g/cm^3)	Волу. удел на смола / Volume of resin, V_m (%)	Просе. вр. V_m / Average value V_m (%)	Волу. удел на зајакнув./ Volume of reinforc., V_f (%)	Просе. вр. V_f/ Average value V_f (%)	Теорет. густина/ Theoret. density, T_d	Процент на пори/ Percentage of voids, (%)	Просе. вр. на пори / Average value of voids, (%)
	1	1,1	2,56	1,8799	50,59		45,75		1,7934	3,6581	
	2	1,1	2,56	1,9150	46,20		54,07		1,8873	-0,2659	
IX	3	1,1	2,56	1,9226	44,97	**45,46**	52,64	**52,08**	1,8873	2,3936	**3,15**
	4	1,1	2,56	1,8831	41,37		56,22		1,9411	2,4042	
	5	1,1	2,56	1,8789	44,17		51,70		1,8873	4,1342	
	1	1,1	2,56	1,7278	41,95		55,41		1,9309	2,6431	
	2	1,1	2,56	1,8924	38,52		58,25		1,9789	3,2252	
X	3	1,1	2,56	1,8422	41,42	**41,18**	57,30	**56,37**	1,9474	1,2744	**2,46**
	4	1,1	2,56	1,8944	41,13		55,89		1,9411	2,9876	
	5	1,1	2,56	1,8093	42,86		54,98		1,9204	2,1589	

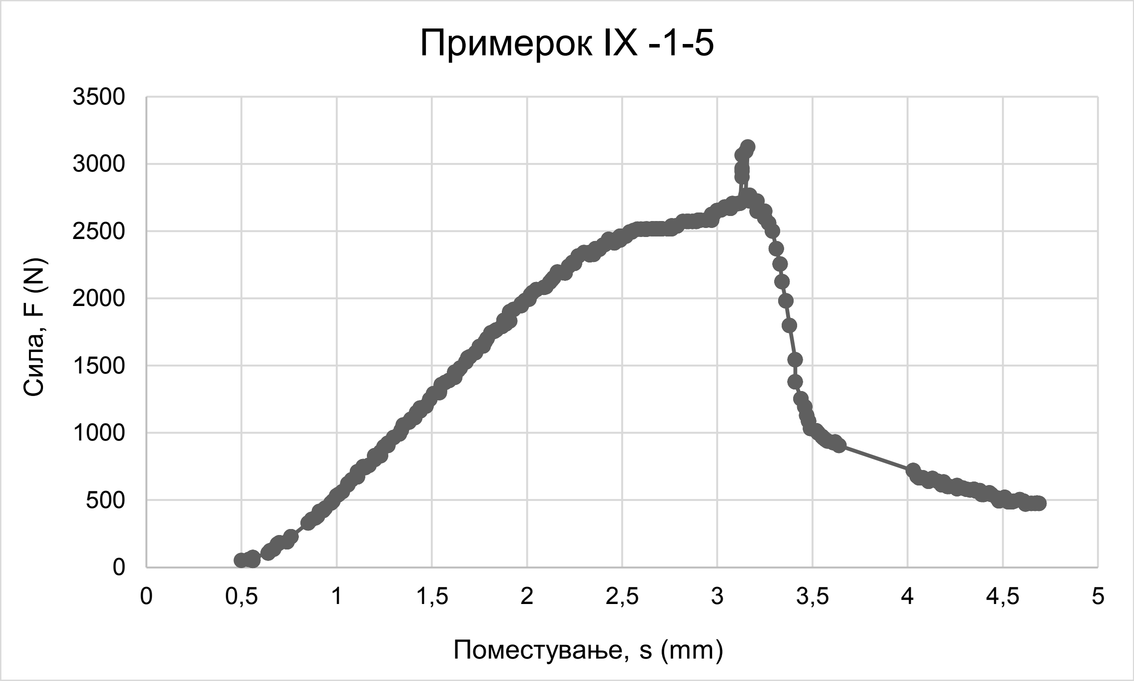
5.2.6.2 Јачина на свиткување и модул на еластичност при свиткување (Flexural strength and modulus of elasticity in flexure)

Кривите сила - поместување кои се добиени од универзалната машина за испитување, според методот со 3 точки на свиткување за дел од композитните примероци зајакнати со унидирекционални ленти се претставени на Слика 5. 32 - Слика 5. 35. Дијаграмите за останатите тестирани композитни примероци се дадени во прилог 10.12 – 10.13. Од секоја композитна плоча се тестираа по 5 примероци (60 x 15 mm) во надолжна насока (MD) и по 5 примероци во напречна насока (CD).

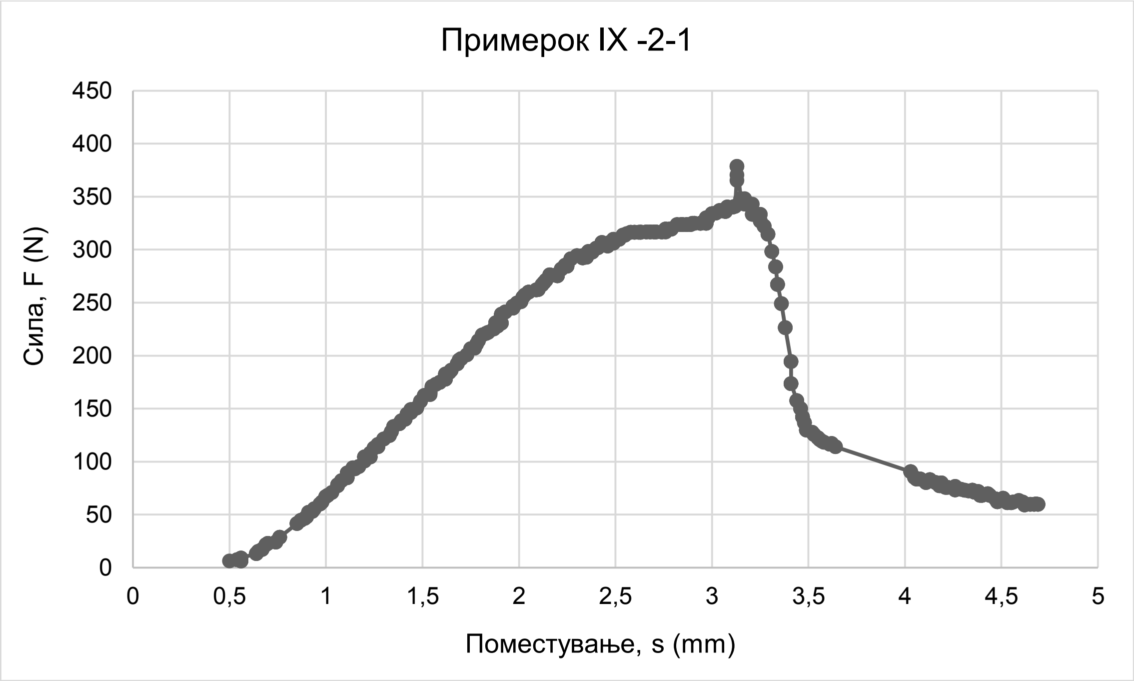
Напрегањето на свиткување, деформацијата и модулот на еластичност при свиткување на композитните примероци беа определени со користење на равенките 4.10, 4.11 и 4.12.

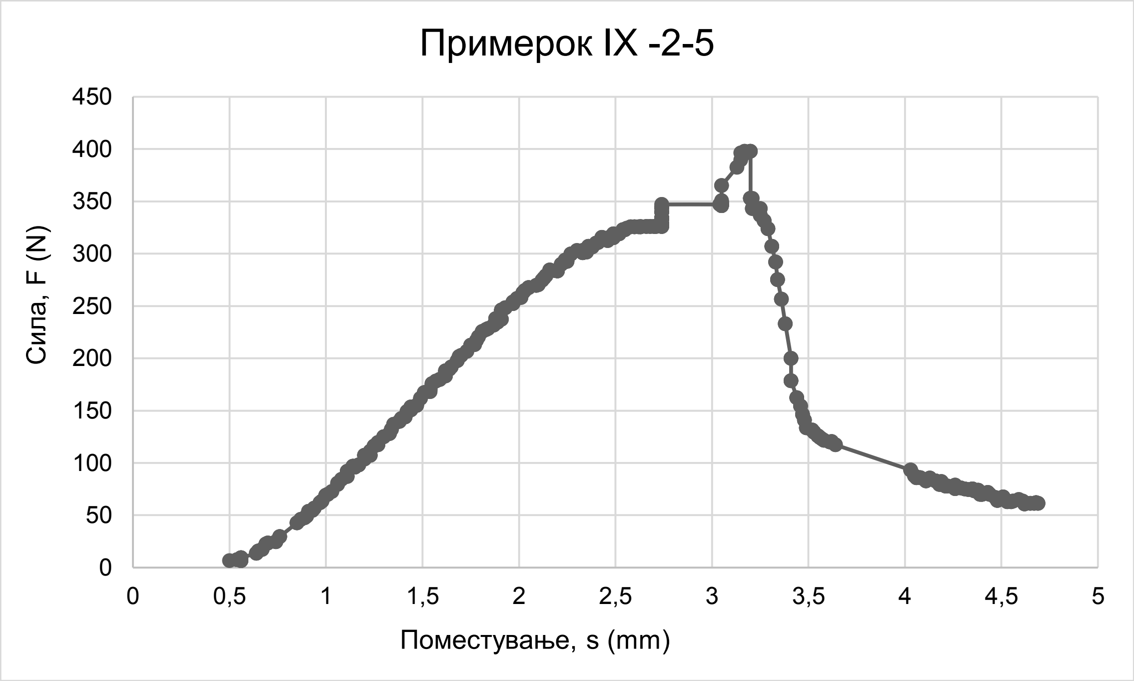
Резултатите добиени од извршените тестирање за јачината на свиткување на композитните примероци, во кои како зајакнувачка компонента се користеа унидирекционални ленти се дадени во Табела 5. 19. Дополнително просечната вредност за напрегањето на свиткување беше пресметана за секоја група на тестирани примероци и споредбена анализа е дадена на Слика 5. 36.



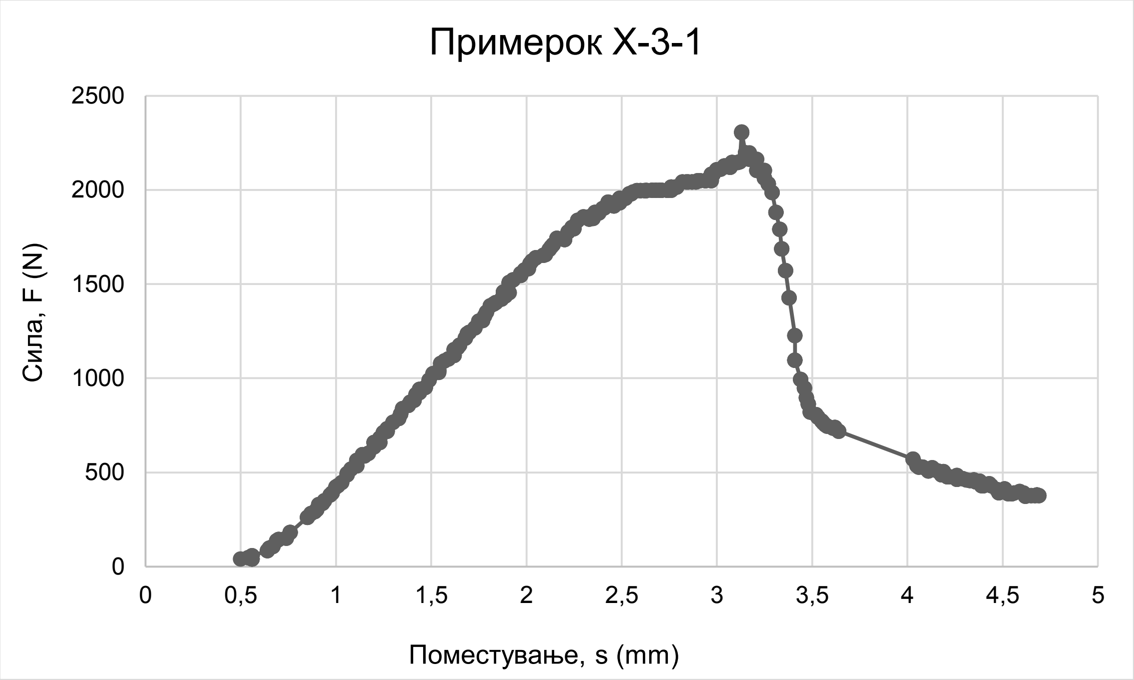


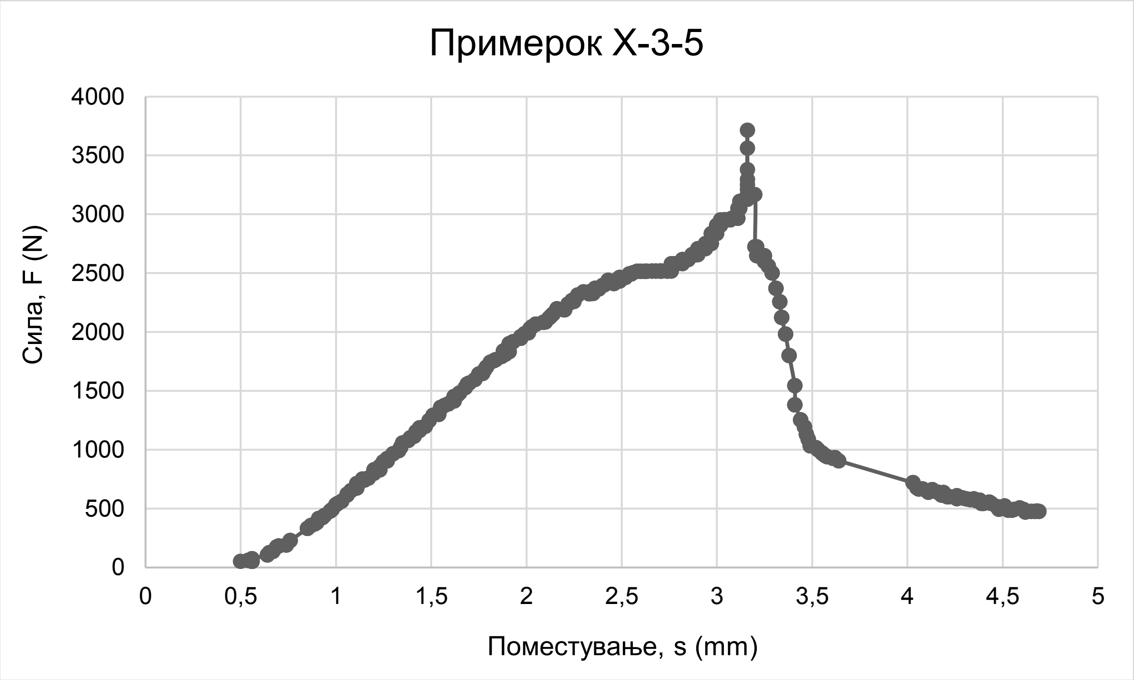
Слика 5. 32 Криви сила– поместување за тест примероците IX-1-1 и IX-1-5
Figure 5. 32 Force and displacement graphs for test samples IX-1-1 and IX-1-5



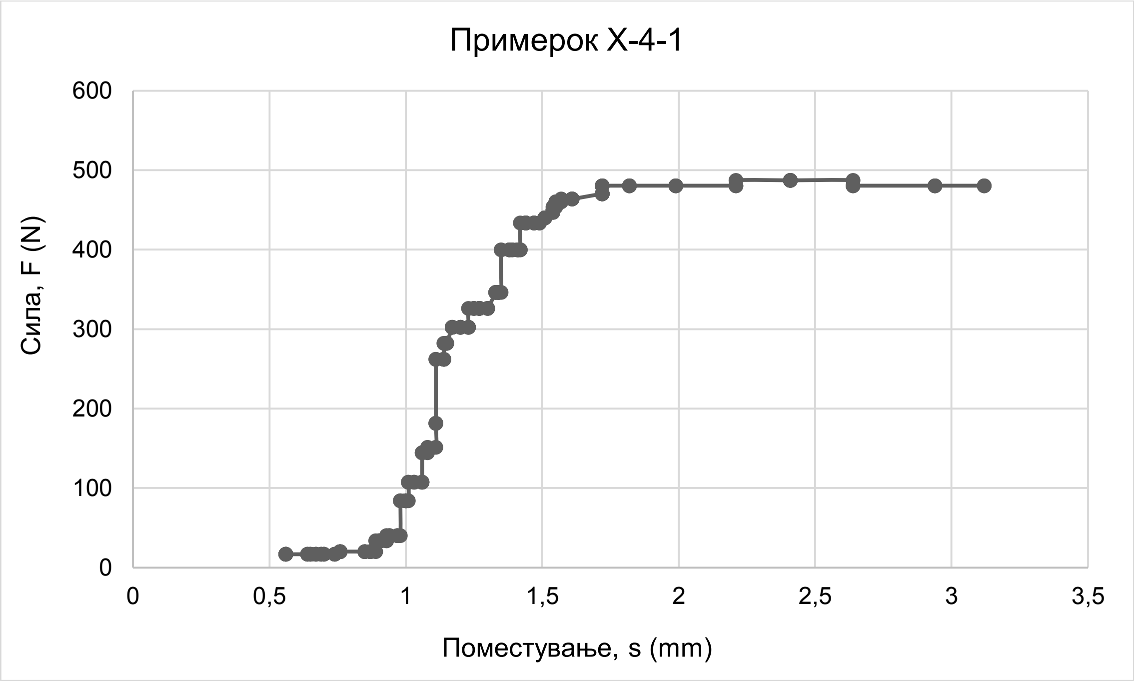


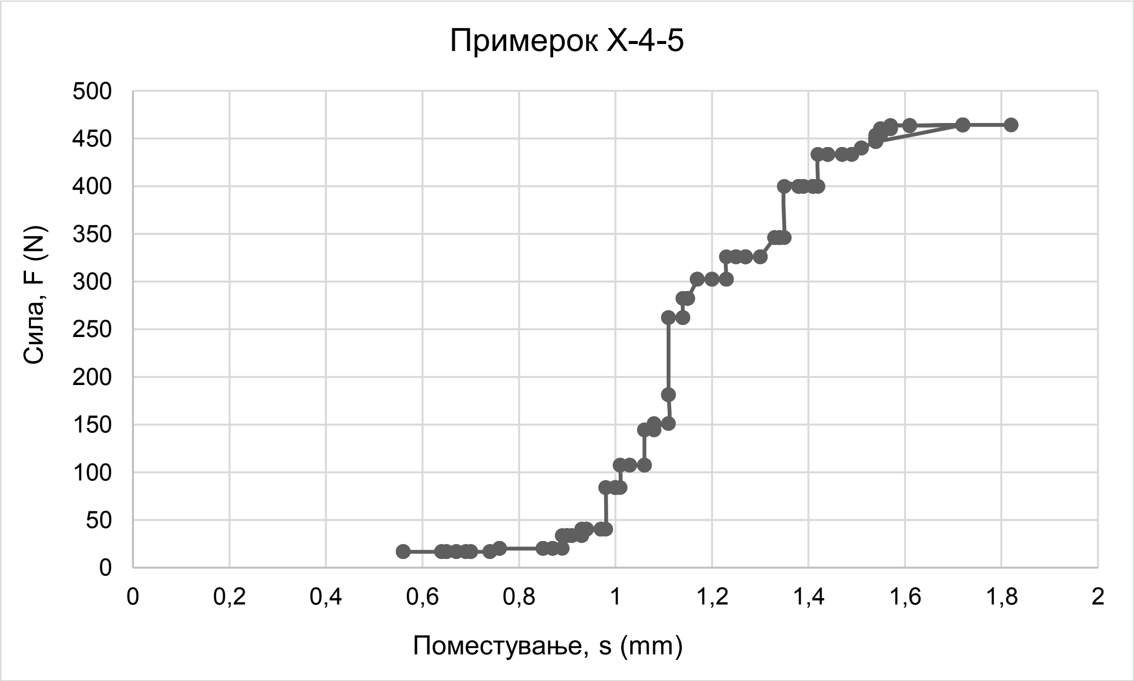
Слика 5. 33 Криви сила– поместување за тест примероците IX-2-1 и IX-2-5
Figure 5. 33 Force and displacement graphs for test samples IX-2-1 and IX-2-5





Слика 5. 34 Криви сила – поместување за тест примероците X-3-1 и X-3-5
Figure 5. 34 Force and displacement graphs for test samples X-3-1 and X-3-5



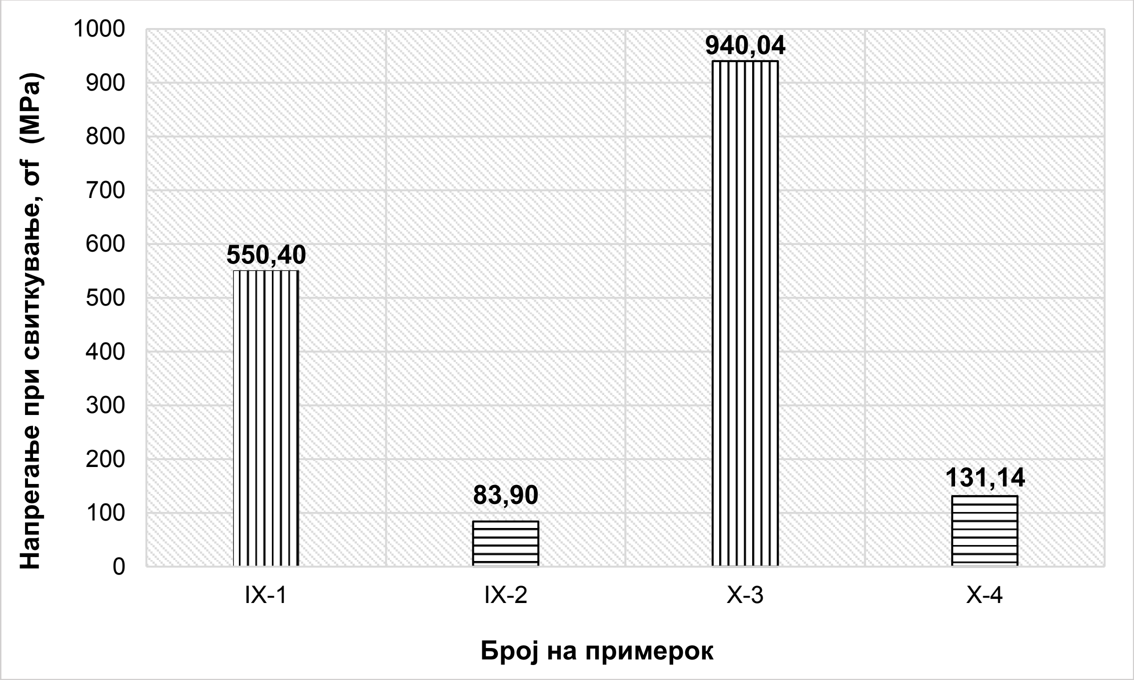


Слика 5. 35 Криви сила – поместување за тест примероците X-4-1 и X-4-5
Figure 5. 35 Force and displacement graphs for test samples X-4-1 and X-4-5

Табела 5. 19 Јачина на свиткување на композитните плочи зајакнати со унидирекционални ленти

Table 5. 19 Bending strength of composite plates reinforced with unidirectional structure

Број на примерок/ Sample number			Ширина/ Width, **b (mm)**	Дебелина/ Thickness, **h (mm)**	Должина/ Length, **L (mm)**	Растојание/ Distance, **L_0 (mm)**	Јачина на свиткување/ Bending strength **Fmax (N)**	Поместување/ Displacement **S (mm)**	**ΔF**	**Δs**	$\frac{\Delta F}{\Delta s}$	Напрегање на свиткување/ Flexural strain, **σf (MPa)**	Модул на еластичност при свиткување/ Modulus of bending, **Ef (GPa)**	Деформација при свиткување/ Bending deformation, **Ɛf (%)**
VII-1	**8c/14B-MD**	1-1	15,07	4,22	60,31	40	2388,96	2,63	1759,68	1,74	1011,31	534,10	60,29	4,16
		1-2	15,11	4,16	60,22	40	2338,56	2,63	1861,44	1,90	979,71	536,60	59,95	4,10
		1-3	15,11	4,45	60,27	40	2944,08	2,63	1848,00	1,41	1310,64	590,36	70,08	4,39
		1-4	15,11	4,44	60,33	40	2596,08	2,63	1786,67	2,02	884,49	522,92	47,51	4,38
		1-5	15,07	4,68	60,48	40	3124,70	2,66	2031,00	1,59	1277,36	568,01	61,92	4,67
		Просечна вредност/ Average					**2678,48**					**550,40**	**59,95**	**4,34**
VII-2	**8c/14B-CD**	2-1	15,11	4,16	60,25	40	378,0	2,63	302,6	2,02	149,80	86,73	9,17	4,10
		2-2	15,09	4,45	60,36	40	389,0	2,63	322,29	2,04	157,99	78,11	8,46	4,39
		2-3	15,11	4,45	60,19	40	405,0	2,66	312,4	1,99	156,98	81,21	8,39	4,44
		2-4	15,11	4,44	60,21	40	411,0	2,7	312,4	2,02	154,65	82,79	8,31	4,50
		2-5	15,09	4,18	60,23	40	398,0	2,7	308,4	1,99	154,97	90,57	9,40	4,23
		Просечна вредност/ Average					**396,2**					**83,882**	**8,746**	**4,332**
VIII-3	**8c/18A-MD**	3-1	15,11	3,56	60,43	40	2306,98	2,63	1915,00	2,02	948,02	722,82	79,21	3,51
		3-2	15,09	3,56	60,40	40	3616,0	2,70	2461,84	2,10	1172,30	1134,46	98,08	3,60
		3-3	15,1	3,68	69,30	40	2520,9	2,63	1954,38	2,10	930,66	739,66	72,82	3,63
		3-4	15,11	3,75	60,48	40	3789,6	2,70	2208,06	1,75	1261,75	1070,08	95,01	3,80
		3-5	15,09	3,78	60,41	40	3714,0	2,66	2411,86	2,00	1205,93	1033,52	89,49	3,77
		Просечна вредност/ Average					**3189,5**					**940,108**	**86,922**	**3,662**
VIII-4	**8c/18A-CD**	4-1	15,07	3,86	60,27	40	487,0	2,00	477,00	1,70	280,59	130,13	19,99	2,90
		4-2	15,11	3,56	60,33	40	436,8	2,64	346,40	1,05	329,90	136,86	27,56	3,52
		4-3	15,11	3,68	60,31	40	430,0	2,15	346,40	1,00	346,40	126,08	27,09	2,97
		4-4	15,1	3,95	60,28	40	541,0	2,05	246,00	0,70	351,43	137,78	23,87	3,04
		4-5	15,07	3,86	60,36	40	467,0	2,64	460,80	1,55	297,29	124,79	21,18	3,82
		Просечна вредност/ Average					**472,36**					**131,3775**	**23,938**	**3,25**



Слика 5. 36 Напрегање при свиткување на композитните плочи зајакнати со унидирекционали ленти добиени при притисок од 30 и 40 bar
Figure 5. 36 Flexural strain of the composite plates reinforced with unidirectional structure obtained at pressures of 30 and 40 bar

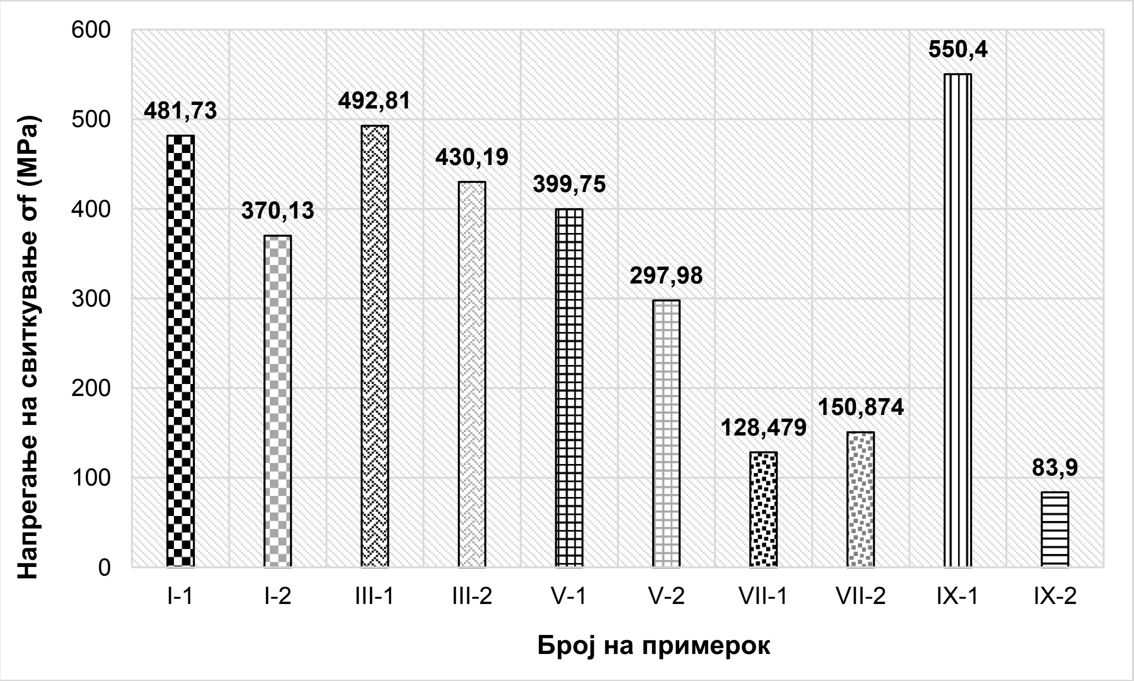
Врз основа на резултатите претставени во Табела 5. 19 и Слика 5. 36 може да се забележи дека примероците добиени од композитните плочи пресувани при поголем притисок од 40 bar имаат значително поголеми вредности за јачината на свиткување во двата правца (940,04 MPa и 131,14 MPa) во однос на примероците добиени од композитните плочи при помал притисок од 30 bar (550,40 MPa и 83,90 MPa).

Од друга страна пак, сите тест примероците во надолжна насока (MD) покажаа значително повисоки вредности за јачината и модулот на еластичност при свиткување во однос на примероците во напречна насока (CD). Ова пред се е резултат на структурата на применетата зајакнувачка компонента. Имено, во надолжна насока силите на свиткување дејствуваат лонгитудинално во насока на унидирекционалните ленти, па поради тоа јачината на свиткување на овие примероци е значително поголема во однос на тест примероците во напречна насока. Кај тест примероците во напречна насока, силите на свиткување дејствуваат нормално на зајакнувачката компонента (унидирекционалниот препрег), па поради тоа овие примероци имаат најмала отпорност на силите на

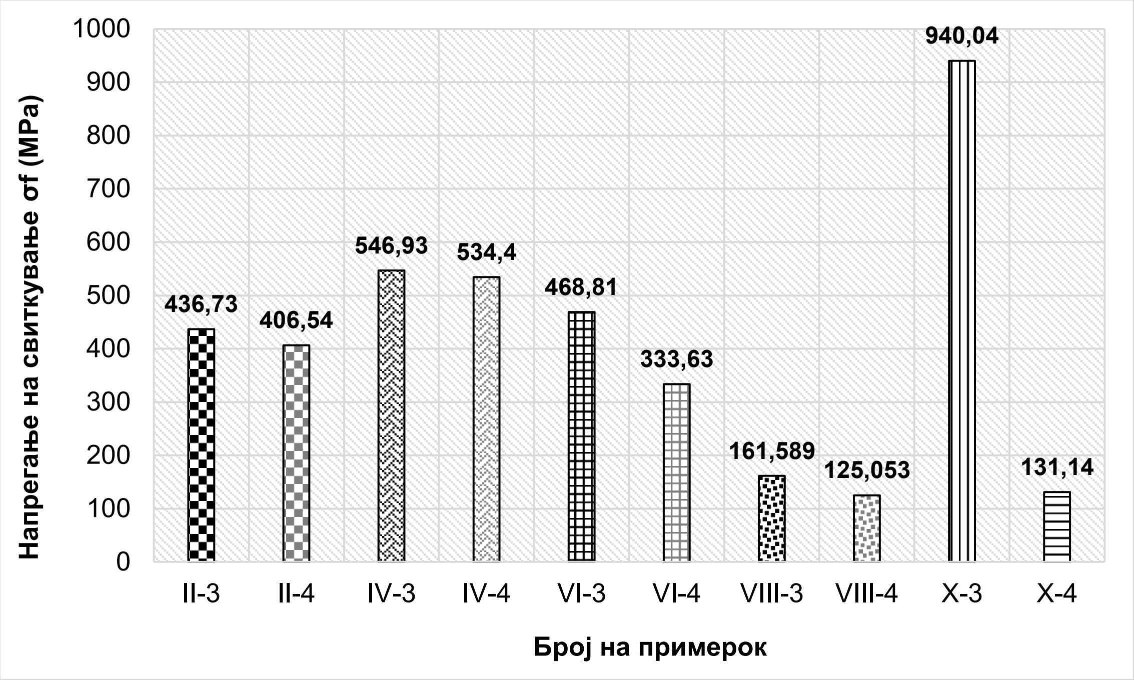
свиткување, која се должи пред се на јачината на епоксидната матрица и во овој правец воопшто не е искористена ефикасноста на зајакнувачката компонента.

5.3 Компаративна анализа на полимерните композитни структури зајакнати со текстил во различни форми (Comparative analysis of polymer composite structures reinforced with textile in various forms)

Врз основа на направените истражувања и добиените резултати може да се забележи важноста на изборот на текстилен зајакнувачки материјал за добивање на композитна структура со добри физичко механички карактеристики. Исто така важно е каков тип на зајакнувачки влакна се користат иако во ова истражување ефектите од формата на текстилот се прикажани и анализирани само на стаклените влакна. На Слика 5. 37 и Слика 5. 38 дадена е сумарна компаративна анализа на добиените јачини на свиткување на полимерните композитни материјали зајакнати со текстил во различни форми.



Слика 5. 37 Напрегање при свиткување на композитните структури зајакнати со текстил во различни форми добиени при притисок од 30 bar
Figure 5. 37 Flexural strain of composite structures reinforced with textiles in different forms obtained at a pressure of 30 bar



Слика 5. 38 Напрегање при свиткување на композитните структури зајакнати со текстил во различни форми добиени при притисок од 40 bar
Figure 5. 38 Flexural strain of composite structures reinforced with textiles in different forms obtained at a pressure of 40 bar

Од дијаграмите претставени на Слика 5. 37 и Слика 5. 38 јасно се воочува дека најголема отпорност на силите на свиткување во надолжна насока имаат композитните примероци зајакнати со унидирeционални ленти (IX-1 и X-3). Во однос на композитните примероци зајакнати со кепер ткаенина, кои покажаа најголема јачина на свиткување (546,93 MPa и 534,40 MPa), тест примероците зајакнати со унидирекционални ленти (X-3) покажаа за околу 42 % поголеми вредности за јачината на свиткување во надолжна насока, но за 75 % помали вредности во напречна насока. Најмала отпорност на силите на свиткување во двете насоки (надолжна и напречна) имаат композитните примероци зајакнати со Е- стаклен неткаен текстил (VII-1, VII-2, VIII-3 и VIII-4).

Композитните структури зајакнати со Е – стаклена ткаенина се одликуваат со оптимална отпорност на силите на свиткување во надолжна и напречна насока. Кај овој вид на композитна структура како резултат на заемното испреплетување на предивата, применетото оптоварување се распределува на соседните предива што овозможува поголема отпорност на силите на свиткување во надолжна и напречна насока.

Разликите во механичките својства на композитите зајакнати со стаклена ткаенина (континуирани влакна) и со стаклен мат (кратки влакна) се условени со тоа што кај последните влакната се оптоваруваат само преку матрицата и јакоста на матрицата (или нејзината слабост) и атхезијата на границата на разделба ги определуваат својствата на овие материјали многу повеќе отколку на материјалите со бесконечни влакна. За целосен пренос на напрегањето врз влакната во композитите со кратки влакна јасно е дека должината на влакната треба да биде значително поголема од некоја критичната. Напрегањата во кратките влакна секогаш се помали отколку во бесконечните при иста деформација на композитот, затоа што краевите на кратките влакна секогаш се помалку оптоварени од средината. Кај ткаенините како зајакнувачка компонента (континуирани влакна), ако се занемари ефектот на нивните краеви, може да се претпостави дека и ткаенината односно и влакната и матрицата се деформираат исто, а приложеното напрегање се дели меѓу двете фази пропорционално на нивните релативни површини на попречен пресек и модулите на еластичност. Во тој случај внесувањето голем волуменски удел на јаки високомодулни влакна во нејака пластична матрица ќе овозможи во принцип целосна реализација на својствата на влакната. Кај композитите со кратки влакна, иако напрегањето се приложува само на матрицата, тоа може делумно да биде пренесено на краткото влакно доколку постои висока атхезиона јачина или високо триење на границата на разделба влакно-матрица. Очигледно дека краевите на влакната не можат да бидат оптоварени бидејќи матрицата не може да го пренесе напрегањето на нив.

Композитите структури зајакнати со ткаенина нудат одредени предности и над конвенционалните унидирекционални ламинати, што ги прави поатрактивни за структурна апликација. Со примена на композити зајакнати со ткаенина можат да се произведат потенки ламинати и структури со комплексна геометрија. Овие композити, исто така имаат поголема отпорност на удар, крутост и димензиона стабилност во однос на унидирекционалните ламинати (Nalik и Shembekar, 1992).

Во рамките на оваа докторска дисертација прикажани се предностите на различни типови на текстилните структурни зајакнувачи со различна геометрија и насока на ориентација на зајакнувачките влакна. Каков тип на зајакнувачки текстил ќе се примени зависи од барањата за перформансите на крајната

композитна структура, а притоа потребно е да се запази оптималниот однос цена/перформанси за истата. Затоа, доколку е потребно може да се направи структура со примена на различни текстилни зајакнувачи во различни слоеви со цел да се искористат предностите на поедините структурни зајакнувачи (Е – стаклени ткаенини, еднонасочни ленти и мат ткаенини). Тоа бара истражување во поголеми рамки со цел добивање на хибридна структура со оптимални физичко - механички својства за дадена апликација. Меѓутоа врз основа на сумираните резултати дадени во рамките на оваа докторска дисертација може да се направи теоретски пристап за соодветен избор на текстилни зајакнувачи како и технологијата за нивно процесирање со цел добивање на хибридна композитна структура која ќе ги задоволи барањата на современите композитни апликации.

6. ЗАКЛУЧОК (CONCLUDING REMARKS)

Врз основа на истражувањата направени во рамките на докторската дисертација може да се заклучи следното:

1. Беше направен литературен преглед за примената на текстил во различни форми како зајакнувачка компонента за добивање на полимерни композитни материјали, најчесто применуваните технологии за нивно добивање, како и преглед на крајните карактеристики на добиените текстилни композити и нивната апликација.
2. За сите истражувања во рамките на оваа докторска дисертација беа изработени текстилни композити врз основа на еднодимензионални (стаклен ровинг) и дводимензионални (стаклени ткаенини и неткаен текстил) текстилни структури. Дополнително беше користен и готов еднонасочен (унидирекционален) стаклен препрег.
3. Истражувањата во рамките на оваа докторска дисертација беа организирани во две групи: анализа на текстилни композити зајакнати со стаклен ровинг и анализа на текстилни композити зајакнати со дводимензионални текстилни структури.
4. Беа користени стаклени ткаенини со различна геометрија (различен преплет) на стаклените влакна, но со приближно иста површинска маса.
5. Како полимерна матрица за сите типови на текстилни композити беше користен епоксиден смолен систем.
6. Со оглед на тоа што за истражувањата во оваа дисертација беа применети различни форми на текстил како зајакнувачка форма, беа применети и анализирани различни современи технологии за нивно процесирање во композитни структури.
7. Текстилните композити беа добивани со примена на современи технологии апликативни за соодветната форма на текстилен зајакнувачки материјал. Имено, беа применети: технологијата за намотување на филаменти за добивање на композитни цевки од стаклен ровинг, технологијата на импрегнација за добивање на препрег материјал од стаклените ткаенини и неткаениот текстил и технологијата на компресионо пресување за добивање на композитни плочи врз основа на препрег материјалите.

8. За првиот дел од истражувањата во рамките на дисертацијата односно за примена на еднодимензионалните стаклени влакна за добивање на текстилни композитни структури беше применета технологијата за намотување на филаменти за процесирање на стаклениот ровинг како зајакнувач натопен со епоксидна смола и беа изработени композитни цевки. Композитните цевки беа изработени со различен дизајн односно со различен агол на намотување на влакната со цел да се покаже влијанието на аголот на намотување на стаклените влакна врз физичко - механичките својства на текстилните композити.
9. За сите тест-примероци (композитни прстени) беше направена анализа на содржината на составните конституенти и беше добиено дека волуменскиот удел на влакната е од (56 - 62 %).
10. За сите произведени композитни цевки со помош на сплит – диск тест метода беше испитувана јачината на истегнување (hoop tensile strength) како карактеристика која е круцијална за дефинирање на квалитетот на овој вид на композитни структури.
11. Од извршените тестирања за јачина на истегнување беше констатирано дека композитните цевки со најголем агол на намотување (90°) покажуваат највисока јачина бидејќи кај овие примероци силата на истегнување дејствува лонгитудинално во правец на стаклените влакна. Примероците со агол на намотување од 45°, се одликуваат со оптимална отпорност во лонгитудинална и аксијална насока, како резултат на спиралното намотување на влакната. Кај овој вид на композитна структура истовремено се истегнуваат и стаклените влакна и матрицата и крајната јачина на истегнување е детерминирана од јачините на двете составни конституенти: зајакнувачката компонента и матрицата. Кај примероците со агол на намотување од 10° силата на истегнување дејствува нормално на стаклените влакна што резултира со најмала отпорност на силите на истегнување. Всушност, тоа е отпорност која се должи пред се на јачината на епоксидниот смолен систем затоа што влакната во овие примероци се во правец каде што нивната ефикасност воопшто не е искористена.
12. Беше направена карактеризација на површината на добиените композитни цевки после нивното тестирање со помош на скенинг електронската микроскопија (СЕМ), со цел да се види атхезијата помеѓу стаклените влакна

и матрицата во текот на процесот на намотување односно дали влакната се добро импрегнирани (натопени) со смола.

13. Од направените СЕМ микрофотографии јасно се гледа дека постои добра поврзаност помеѓу влакната и смолата, а на местата на прекин од тестирањето беше забележана одредена деструкција на влакната и на матрицата.
14. Добиените резултати од сите истражувања во првиот дел од оваа докторска дисертација покажаа дека аголот на намотување на зајакнувачката компонента има значајно влијание врз механичките својства на композитните цевчести структури. Имено, поголеми агли на намотување на стаклените влакна обезбедуваат добивање на композитни цевки со поголема јачина на истегнување и обратно.
15. За вториот дел од истражувањата во рамките на дисертацијата односно за примена на Е - стаклените ткаенини и неткаениот текстил за добивање на текстилни композитни структури беше применета технологијата на импрегнација (рачно полагање) и беа изработени препрег материјали со соодветни карактеристики кои дополнително беа процесирани во композитни плочи со примена на технологија на компресионо пресување.
16. Со примена на стандардни методи беа определени структурните карактеристики на применетите Е - стаклени ткаенини: масата на единица површина, густината на ткаенината по основа и јаток и тип на преплет.
17. Беа направени електронски микрофотографии на структурата на користените Е - стаклени ткаенини со користење на бинокуларен микроскоп и скенирачки електронски микроскоп со цел да се воочат разликите во структурата на применетите стаклените ткаенини.
18. Беа определени основните физичко - механички својства (јачина на истегнување и издолжување при кинење во надолжен и напречен правец и модул на еластичност) на применетите Е – стаклени ткаенини според стандардот ASTM D 5035.
19. Од добиените резултати беше заклучено дека сите анализирани Е - стаклени ткаенини имаат поголема јачина на истегнување во насока на основата отколку во насока на јатокот. Е – стаклената ткаенина во платно преплет има најголема отпорност на силите на кинење по основа и јаток. Ова е и разбирливо бидејќи овој тип на преплет се одликува со најцврсто меѓусебно

поврзување на основините и јаточните жици. Најмала јачина на истегнување по основа и јаток има стаклената ткаенина во панама преплет. Малата јачина на оваа ткаенина е резултат на самата структура на ткаенината во која јасно се видливи празните меѓупростори при поврзувањето на основините и јаточните жици.

20. Беа изработени композитни плочи врз основа на Е - стаклени ткаенини со различен преплет. Композитните плочи беа изработени од ист број на слоеви препрег и сите беа процесирани на два различни притисоци (30 bar и 40 bar) со цел да се добие подобро слепување на слоевите препрег. Како параметар кој беше променлив беше само структурата на стаклените ткаенини (преплетот) со цел да се анализира нејзиното влијание врз физичко - механичките карактеристики на плочите.
21. За сите изработени композитни плочи беше направена анализа на содржината на составните конституенти и содржината на пори (%). Со цел да се види дистрибуцијата на порите во композитните примероци за дел од примероците беа направени микроснимки со помош на оптички микроскоп.
22. Врз основа на добиените резултати за содржина на конституентите во композитните примероци зајакнати со Е- стаклени ткаенини беше добиено дека масениот удел на зајакнувачката компонента е од 65 - 72 %, додека епоксидната смола е со масен удел од 28 - 35 %.
23. Беше анализиран процентот на пори во композитните плочи. Највисок процент на пори (4,93 %) беше забележан кај композитните плочи зајакнати со платно, пресувани при притисок од 40 bar и композитните примероци зајакнати со панама ткаенина (3,68 %), пресувани при притисок од 30 bar. За разлика од нив, композитните примероци зајакнати со кепер ткаенина покажаа релативно мал процент на пори (1,48 и 1,25 %). Композитните структури зајакнати со стаклен мат, пак, имаат многу повисок процент на пори (5,28 и 7,12 %) во однос на композитните примероци зајакнати со стаклена ткаенина.
24. За сите произведени композитни плочи беше тестирана јачината на свиткување и модулот на еластичност при свиткување според стандардот EN ISO 14125.
25. Тест примероците од композитните плочи зајакнати со кепер ткаенина добиени со пресување при притисок од 30 и 40 bar, покажаа највисока

отпорност на силите на свиткување во двете насоки (MD и CD) и значително високи вредности за модулот на еластичност при свиткување.

26. Композитните плочи зајакнати со платно ткаенина добиени со пресување при притисок од 30 bar покажаа незначително помала јачина на свиткување во надолжна насока (MD) во однос на композитните плочи зајакнати со кепер ткаенина, но за 18 % поголема јачина на свиткување во однос на композитните плочи зајакнати со панама ткаенина. Јачината на свиткување во напречна насока (CD) е за 14 % помала во однос на јачината на свиткување на композитните примероци зајакнати со кепер ткаенина и за околу 20 % поголема во однос на јачината на свиткување на композитните плочи зајакнати со панама ткаенина. Исто така, композитните плочи зајакнати со истата ткаенина, но пресувани при поголем притисок од 40 bar, покажаа помала јачина и незначително помали вредности за модулот на еластичност при свиткување во двете насоки, во однос на композитните плочи зајакнати со кепер ткаенина. Помалата јачина на свиткување кај примероците зајакнати со платно ткаенина може да е резултат и на релативно високиот процент на пори забележан кај овие примероци (I - 2,56 %, II – 4,93 %), кој има значително влијание врз механичките својства.
27. Најмала јачина и најмал модул на еластичност при свиткување, во надолжна и напречна насока беа добиени за тест примероците од композитните плочи (V-1 и V-2) зајакнати со панама ткаенина. Причината за ова, покрај малата јачина на панама ткаенината, исто така може да е и релативно високиот процент на пори (3,68 %).
28. Врз основа на добиените експериментални резултати беше заклучено дека јачината и модулот на еластичност при свиткување кај композитните примероци зајакнати со Е - стаклени ткаенини се поголеми во лонгитудинална насока во споредба со аксијалната насока. Од овие резултати јасно е дека типот на стаклена ткаенина и ориентацијата на влакната како производни параметри директно влијаат врз својствата на свиткување на композитните плочи.
29. Јачината на свиткување кај композитните примероци зајакнати со стаклен мат во надолжна и напречна насока беше добиено дека е приближно иста. Во однос на композитните примероци зајакнати со стаклена ткаенина овие тест примероци покажаа значително пониски вредности за јачината и

модулот на еластичност при свиткување (> 50 %). Ова се должи на разликите во структурата на применетата зајакнувачка компонента.

30. Беа процесирани композитни плочи врз основа на готов унидирекционален стаклен препрег на исти услови како што беа процесирани останатите композитни плочи врз основа на рачно импрегнираните стаклени ткаенини.
31. Сите композитни примероци зајакнати со унидирекционални ленти покажаа значително повисоки вредности за јачината и модулот на еластичност при свиткување во надолжна насока (MD) во однос на примероците во напречна насока (CD). Имено, во надолжна насока силите на свиткување дејствуваат лонгитудинално во насока на унидирекционалните ленти, па поради тоа јачината на свиткување на овие примероци е значително поголема во однос на тест примероците во напречна насока.
32. Врз основа на добиените експериментални резултати може да се констатира дека композитните примероци зајакнати со Е – стаклена ткаенина се одликуваат со оптимална отпорност на силите на свиткување во надолжна и напречна насока. Кај овој вид на композитна структура како резултат на заемното испреплетување на предивата, применетото оптоварување се распределува на соседните предива што овозможува поголема отпорност на силите на свиткување во надолжна и напречна насока.
33. Врз основа на сите направени анализи на добиените композитни структури зајакнати со текстил во различна форма (еднодимензионален стаклен ровинг и дводимензионални стаклени ткаенини) беше покажано влијанието на различните форми на зајакнувач врз физичко - механичките својства на структурите.
34. Типот на преплет на стаклените влакна значајно влијае во апликацијата на технологиите за нивно процесирање и врз крајните механички својства на композитните структури.
35. Добиените композитни структури ги задоволуваат барањата за современи материјали кои истовремено обезбедуваат одлична јакост, а мала тежина и кои можат да се применат како носечки конструктивни делови во различни индустрии.
36. Добиените композитни структури со различен дизајн даваат можност за избор на соодветна форма на текстилниот зајакнувач во зависност од крајната апликација.

37. Според добиените перформанси на композитните структури и добиените сознанија за примена на текстилен зајакнувач во различни форми, се создава можност за правење на различни комбинации и добивање на хибридни материјали во зависност од крајната апликација на композитната структура.

7. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. Aarthy, S., Vadivambal, R., Sharmila, C., Gowri, K., & Jithmon, M. (2015). Experimental Determination of Flexural Strength of Glass Fiber Reinforced Composite Laminates,. *IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development, Vol. 3*, 151-155.

2. Alifa, N., Carlssona, L., & Booghb, L. (1998). The effect of weave pattern and crack propagation direction on mode I delamination resistance of woven glass and carbon composites. *Composites Part B 29B*, 603-611.

3. Aluga, R. (2010). *Ispitivanje žilavosti kompozitnih materijala.* Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje.

4. Assaleh, T. A. (2011). *Ultimate elastic wall stress envelopes for (gre) pipes,* Thesis. University of Newcastle upon Tyne.

5. ASTM, D. 5.-9. (n.d.). *Standard Specification for Glass Fiber Strands.* Annual Book of ASTM Standards.

6. ASTMD2290. (2013). *Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe by Split Disk Method.* West Conshohocken: ASTM International.

7. ASTMD2584. (1994). *Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins.* Annual Book of ASTM Standards.

8. ASTMD2734. (2011). *D2734 – 09 Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics.* ASTM Int'l.

9. ASTMD3171. (2015). *Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials.* West Conshohocken, United States: ASTM International.

10. ASTMD3776. (2002). *Standard Test Method forMass Per Unit Area (Weight) of Fabric.* West Conshohocken: ASTM International.

11. ASTMD5035. (2003). *D 5035 - Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method).* ASTM International: West Conshohocken.

12. ASTMD792. (2008). *D 792 – 08, Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement.* ASTM.

13. Aveston, J., Kelly, A., & Sillwood, J. M. (1980). Long –term strength of glass reinforced plastics in wet environments. In A. R. Bunsell, & e. al., *Advances in Composite Materials* (pp. 556 -568). Paris: Pergamon.

14. Axinte, A., Ţaranu, N., & Bejan, L. (2016). Modelling patterns for fabric reinforced composites. *Buletinul Institutului Politehnic Din Iaşi*.

15. Babukiran, B., & Harish, G. (2014). Influence of Resin and thickness of Laminate on Flexural Properties of Laminated Composites. *Certified International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT) Volume 3, Issue 1*, 279-287.

16. Bagherpour, S. (2012). Fibre Reinforced Polyester Composites. In H. E.-D. Saleh, *Polyester.* InTech.

17. Barbero, E. J. (2011). *Introduction to composite material design.* London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, Second edition.

18. Basavaraj, Y., & Raghavendra, H. (2014). Experimental and Numerical Study of the Influence of Volume Fraction on Tensile and Flexural Strength of E-Glass Epoxy Cross Ply Laminates, . *International Journal of Mechanical and Industrial Technology ISSN 2348-75*, 29-44.

19. Beakou, A., & Mohamed, A. (2001). Influence of variable scattering on the optimum winding angle of cylindrical laminated composites. *Compos. Struct.*, 287-293.

20. Bilisik, K. (2013). Three-dimensional braiding for composites: A review. *Textile Research Journal 83(13)*, 1414–1436.

21. Bilyeu, B., Brostow, W., & Menard, K. P. (2000). Epoxy thermosets and their applications i: chemical structures and applications. *Journal of Materials Education Vol. 21(5&6):* , 281-286.

22. BS EN 1049-2 (1994). *BS EN 1049-2, Textiles - Woven fabrics - Construction-Methods of analysis - Determination of Number of Threads per Unit Length,.*

23. Callister, W., & Rentwich, D. (2010). *Materials Science and Engineering an Introduction. .* John Wiley & Sons, Inc.

24. Carlson, C. (1995). *The Influence of Matrix Modification of the Properties of 3-D Woven Composite, A Dissertation for the Degree Doctor of Philosophy, .* North Carolina: North Carolina State University.

25. Cazeneuve, C., Joguet, P., Maile, J., & Oytana, C. (1992). Predicting the mechanical behavior of Kevlar/Epoxy and carbon/epoxy filament wound tubes. *Composites, Volume 23, Number 6*, 415-424.

26. Charrier, J. M. (1990). *Polymeric materials and processing. Plastics, elastomers and composites.* Munich: C. Hanser Publishers.

27. Chauhan, S. R., Gaur, B., & Dass, K. (2011). Effect of fiber loading on mechanical properties, friction and wear behavior of vinyl ester composites under dry and water lubricated conditions. *International Journal of Material Science, vol. 1*, 1-8.

28. Chawla, K. (1985). *Composite materials science and engineering,.* New York: SpringerVerlag.

29. Chawla, K. (1998). *Composite Materials. Science and Engineering, second edition.* United States of America: Springeer Science.

30. Chen, X. (2007). Technical aspect: 3D woven architectures. *Proceedings of the NWTexNet 2007 Conference, Blackburn*.

31. Cherif, C. (2016). *The Textile Process Chain and Classification.* Berlin Heidelberg: Springer .

32. Ciobanu, L. (2011). Development of 3D Knitted Fabrics for Advanced Composite Materials. In B. Attaf, *Advances in Composite Materials - Ecodesign and Analysis.* InTech.

33. Cohen, D. (1997). Influence of filament winding parameters on composite vesselquality and strength. *Elsevier Science Limited, Composites Port A 28A* , 1035-1037 .

34. Cui, Y., & Yin, Z. (2017). Development of a tension system and influence of ultimate tension on the properties of composites. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 272.

35. Ćunko, R., & Pezelj, E. (2003). *(2002). Tekstilni materijali.* Čakovec: Zrinski d.d. .

36. Davallo, M., Pasdar, H., & Mohseni, M. (December 2010). Effects of laminate thickness and ply-stacking sequence on the mechanical properties and failure mechanism of unidirectional glass-polyester composites. *International Journal of ChemTech Research, Vol. 2, No.4*, 2118-2124.

37. De Carvalho, J., Lossie, M., Vandepitte, D., & Van Brussel, H. (1995). Optimization of filament-wound parts based on non-geodesic winding. *Compos. Manuf.*, 79-84.

38. Dehury, J. (2013). *Processing & characterization of jute/glass fiber reinforced epoxy based hybrid composites.* Rourkela: Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology Rourkela.

39. Dong, C., & Davies, I. J. (2012). Flexural properties of hybrid composites reinforced by S-2 glass abd T700S carbon fibres. *Composites Part B: Engineering, Vol. 43, Issue 2*, pp. 573-581.

40. Dong, C., & Davies, I. J. (2014). Flexural properties of glass and carbon fiber reinforced epoxy hybrid composites. *J. Materials: Design and Applications, Vol. 227, Issue 4*, 251-258.

41. Eastes, W., Hofman, D., Wingert, J., & Fibers, B.-F. G. (4 Aug 1998). *U.S. Patent No. 5,789,329, .*

42. Edward, C. (2011). *Influence of Material Selection and Fabrication Process Repeatability on Mechanical Properties of Glass-Polymer Matrix Composite Structures.* Clemson University,.

43. Encyclopædia Britannica, I. (2018*).* Преземено на 22 февруари 2018 г. https://kids.britannica.com/students/assembly/view/53835

44. ENISO14125. (1998). *EN ISO 14125 Fibre-reinforced plastic composites, Determination of flexural properties.* European Committee for Standardization.

45. Filament winding (2018). Преземено на 22 февруари 2018 г. http://nptel.ac.in/courses/112107085/module5/lecture7/lecture7.pdf.

46. Fitriaha, S. N., Abdul Majidb, M. S., Daudc, R., & Afendid, M. (2014). The Effects of Winding Angles and Elevated Temperatures on the Crushing Behaviour of Glass Fibre/Epoxy Composite Pipes. *Applied Mechanics and Material, volume 695*, 639-642.

47. Fukuta, K., Onooka, R., & Aoki, E. n. (1984). 3D fabrics for composites. *S. Kawabata, 15th Textile Research Symposium. Osaka: The Textile Machinery Society of Japan* , 36-38.

48. Fung, W., & Hardcastle, M. (2001). *Textiles in Automotive Engineering. .* Woodhead Publishing Limited.

49. Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4th ed.* United States of America: John Wiley & Sons, Inc.

50. Gupta, P. (1988). Glass Fibers for Composite Materials. In A. Bunsell, & Ed., *Fibre Reinforcements for Composite* (pp. 19-72). Elsevier Publishers.

51. Hamed, A., Khalid, Y., Sapuan, S., Hamdan, M., Younis, T., & SahariB.B. (2007). Effects of Winding Angles on the Strength of Filament Wound Composite Tubes Subjected to Different Loading Modes. *Polymers & Polymer Composites, Vol. 15, No. 3,* , 199-206.

52. Hearle, J. (2001). *High-Performance Fibers.* Textile Institute.

53. HexPly prepreg technology. Hexcel Corporation (2013). Преземено на 10 јануари 2018 г. https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/design-materials-fabrication/composite-materials/ dam/ Education/Manufacturing of_Polymer_Composites/FS2017/Prepreg_Technology. pdf.

54. Hoa, S. V. (2009). *Principles of the manufacturing of composite materials.* DEStech Publications, Inc.

55. Horrocks, A. R., & Anand, S. C. (2000). *HANDBOOK OF TECHNICAL TEXTILES.* Cambridge England: Woodhead Publishing Limited.

56. Huntsman International LLC. (2011). Преземено на 29 јануари 2018 г. http://www.huntsman.com/corporate/a/Products?p_letter=A.

57. Hu, J. (2008). *3-D fibrous assemblies. Properties, applications and modeling of three-dimensional textile structures.* Cambrige England: Woodhead Publishing in Textiles.

58. Hull, D., & Clyne, T. (1996). *An Introduction to Composite Materials. 2nd ed.* Cambridge, UK.: Cambridge University Press: .

59. Ishikawa, T., & Chou, T. -W. (1982). Stiffness and strength behaviour of woven fabric composites. *Journal of Materials Science*, 3211-3220.

60. Jones, D., Jones, I., & Middleton, V. (1996). Improving composite lay-up for non-spherical filament-wound pressure vessels. *Composites:Part A* , 311-317.

61. Jones, F. R. (2003). The effects of aggressive enviroments on fatique in composites. In B. Harris, *Fatique of Composite Materials,* (pp. Chapter 4, 117 – 146). Cambriage: Woodhead.

62. Jones, R. M. (1999). *Mechanics of Composite Materials, 2nd Edition, .* United States of America: Taylor & Francis.

63. JPS Industries Inc., JPS Composite Materials. Преземено на 15 декември 2017г. http://jpsglass.net/wp-content/uploads/2015/08/docslide.us_jpsdatabook 55845c9747baf.pdf

64. Jweeg, M. J., Hammood, A. S., & Al-Waily, M. (2012). Experimental and Theoretical Studies of Mechanical Properties for Reinforcement Fiber Types of

Composite Materials. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS Vol:12*, 62-75.

65. Kabir, M. (2000). Finite eelement analysis of composite pressure vessels with a load sharing metallic liner. . *Compos. Struct.*, 247-255.

66. Karpuz, P. (2005). *Mechanical characterization of filament wound composite tubes by internal pressure testing.* Middle East Technical University.

67. Khazanov, V., Kolesov, Y. I., & Trojimov, N. N. (1995). Glass fibres in. In V. Kostikov, *Fibre Science and technology* (pp. 15-230). London: Chapman & Hall.

68. Khokar, N. (2001). 3D-weaving: theory and practice. *J Text Inst* , 193–207.

69. Ko, F. K. (1989). Three-dimensional fabrics for composites. In T. Chou, F. Ko, & eds, *Textile Structural Composites, vol. 2,* (pp. 129-172). Amsterdam: Flsev icr.

70. Ko, F. K. (1993). Advanced Textile Structural Composites. In J. Morán-López, & J. Sanchez, *Advanced Topics in Materials Science and Engineering* (pp. 117-137). Boston: Springer.

71. Ko, F. K., & Du, G. W. (1998). In S. .. Peters, *Handbook of Composites* (pp. 397-424). London: Chapman and Hall.

72. Koussios, S., & Bergsma, O. (2002). Uninterrupted hoop-and polar-fibre paths on cylindrical pressure vessels using non-geodesic trajectories. *American Society for Composites 17th Annual Technical Conference Proceeding CD, West Lafayette*, 21 - 23.

73. Kukliński, M. (2011). Influence of voids and layers number on mechanical properties of hand lay-up bended laminates. *Journal of Polish CIMAC*, 69-74.

74. Lakshmi Prasanna, P., Lakshmi Sramika, M., & Seema Rani, P. (2016). Estimation of optimum fiber angle of composite reinforced tube using FEA. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 154-157.

75. Lee, S. M. (1990). *International encyclopedia of composites, Volume 2.* New York: CH Publishers.

76. Lee, S. W., Lee, S. G., Bae, D., & Kim, B. S. (2005). Flexural characteristics of filament wound GFRP composite bridge desk. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers Magazine*, 751-760.

77. Lei, S., & Young, R. (1999). Measurement of the local fibre strain distributions in woven composites. *International Committee On Composite Materials 12 Conference*, (p. 850). Paris, France.

78. Loewenstein, K. L. (1993). *The manufacturing technology of continuous glass fibres, Edition 3,.* Amsterdam : Esevier.

79. Long, A. C. (2005). *Design and manufacture of textile composites.* England: Woodhead Publishing Limited.

80. Mallick, P. (1997). *Composites Engineering Handbook.* New York: Marcel Dekker, Inc.

81. Mallick, P. (2008). *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design.* CRC Press, Taylor & Francis Group.

82. Masuelli, M. (2013). Introduction of Fibre-Reinforced Polymers − Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes. In M. Masuelli, *Fiber Reinforced Polymers - The Technology Applied for Concrete Repair.* InTech.

83. Matabola, K., De Vries, A., Moolman, F., & Luyt, A. (2009). Single polymer composites: a review. *Material Science*, 6213–6222.

84. Mathews, F., & Rawlings, R. (1994). Polymer Matrix Composite. In *Composite Materials: Engineering and sciences* (pp. 168-200). Oxford, ISBN 0-412-55960-9, UK,: The Alden Press,.

85. Mazumdar, S. (2002). *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering.* CRC Press.

86. Mazumdar, S. K. (2002). *Composites Manufacturing, Materials, Product and Process Enginering.* CRC Press.

87. McCarthy, R. F., Haines, G. H., & Newley, R. A. (1994). Polymer composite applications to aerospace equipment. *Composites Manufacturing*, 83-93.

88. Mertiny, P., & Ellyin, F. (2002). Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites. *Journal of Composites: Part A, Vol 33* , 1615-1622.

89. Mihaljević, T. (2011). *Mehaniĉka svojstva kompozita s polimernom matricom.* Karlovcu: Veleuĉilište u Karlovcu.

90. Mijajlovikj, M., Risteska, S., Samakoski, B., & Stevanoska, N. (2017). Mathematical Model on Flexural Properties of Composite Laminates. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 526-530.

91. Miller, D. (1987). Glass Fibers,. *Composites, Vol 1, Engineered Materials Handbook, ASM International,*, 45-48.

92. Miller, T. E. (1990). *Introduction to Composites.* Composites Institute Publications, 1990.

93. Miracle, D., & Donaldson, S. (2001). *ASM Handbook Volume 21: .* Ohio: ASM International.

94. Miravette, A. (2004). *3-D Textile Reinforcements in Composite Materials.* Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, Cambridge.

95. Mohanty, A., Misra, M., & Drzal, L. (2001). *Composite Interfaces, 8,.*

96. Mouritz, A., Bannister, M., Falzon, P., & Leong, K. (2000). Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. . *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*.

97. Naik, N., & Shembekar, P. (1992). Elastic Behavior of Woven Fabric Composites: II—Laminate Analysis. *Journal of Composite Materials*.

98. Naik, N., & Shembekar, P. (1993). Elastic Analysis of Woven Fabric Laminates: Part II. Mixed Composites. *Journal of Composites, Technology and Research, Vol. 15, No. 1*, 34-37.

99. Nalik, N. K., & Shembekar, P. S. (1992). Elastic Behavior of Woven Fabric Composites: III - Laminate Design. *Journal of composite materials*.

100. Nayak, S. Y., Shenoy H., S., Rao U., S., Narang, K., & Vardhan Pant, K. (2015). Mechanical properties of multi layer plain weave and 3-D glass fabric epoxy composites. *International Journal of Composite Materials* , 30-36.

101. Ogale, B., & Alagirusamya, P. (2003). Textile preforms for advanced composites. *Department of Textile Technology, Indian Institute of Technology, New Delhi 110 016, India*.

102. Penn, L., & Wang, H. (1998). Epoxy Resins. In S. Peters, *Handbook of composites* (pp. 48-75). Springer Science.

103. Pinar, K. (2005). *Mechanical characterization of filament wound composite tubes by internal pressure testing.* Ankara, Turkey: The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Middle East Technical University.

104. Pop Metodieva, B. (2017). *Примена на стаклени влакна во технологија за намотување на филаменти: дизајн и анализа на процес.* Штип: Универзитет „Гоце Делчев“, Технолошко-технички факултет.

105. Pop Metodieva, B., Zhezhova, S., Srebrenkoska, S., Naseva, S., & Srebrenkoska, V. (2016). Design of polymer composite pipes produced by filament winding technology . *Machines, Technologies, Materials, 10 (1).*, 26-29.

106. Rahman, M., Ramakrishna, S., Prakash, J., & Tan, D. (1999). Machinability study of carbon fiber reinforced composite. *Journal of Materials Processing Technology*, 292–297.

107. Rathnakar, G., & Shivanan, H. K. (January 2013). Experimental evaluation of strength and stiffness of fiber reinforced composites under flexural load. *International Journal of Engineering and Innovative Technology Vol. 2, Issue 7,*.

108. Rathnakar, G., & Shivanand, H. K. (June 2012). Effect of thickness on flexural properties of epoxy based glass fiber reinforced laminate . *International Journal of Science and Technology, Vol. 2 No.6*.

109. Ratna, D. (2005). *Epoxy Composites: Impact Resistance and Flame Retardancy.* Rapra Review Report .

110. Reber, R. (1999). *Micro- and macromechanical properties of knitted fabric reinforced composites (KFRCS) with regard to environmental exposure.* Zurich: Swiss federal institute of technology Zurich.

111. Risteska, S., Samakoski, B., & Stefanovska, M. (2014). Properties of Composite Trapezoidal Parts Manufactured with help of Filament Winding Technology using Taguchi Method. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 250.

112. Risteska, S., Samakoski, B., Sokoloski, Z., & Stefanovska, M. (2014). Investigation of banding properties and damages of glass fiber/epoxy resin

composite pipes. *The 46th International October Conference on Mining and Metallurgy, Bor Lake, Bor (Serbia)*.

113. Risteska, S., Trajkovska, P. A., Stefanovska, M., Trajkovska, A., & Samakoski, B. (2015). Design of experiment on final resin mass fraction in composite. *Journal of society for development of teaching and business processes in new net environment in B&H*, 305.

114. Rossi, F., & Williams, G. (1997). A New Era in Glass Fiber Composites. *Proc., 28th AVK Conf.*, (pp. 1-10). Baden-Baden, Germany.

115. Rousseau, J., Perreux, D., & Verdiere, N. (1999). The influence of winding patterns on the damage behaviour of filament-wound pipes. *Compos. Sci. Technol.*, 1439–1449.

116. Satheesh Kumar Reddy, P., Nagaraju, C., & Hari Krishna, T. (2012). Optimum Design And Analysis Of Filament Wound Composite Tubes In Pure And Combined Loading. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*.

117. Scardino, F. (1989). An introduction to textile structures and their behaviour. In T. Chou, & F. .Ko, *Textile Structural Composites, Composite Materials Series, vol. 3. .* Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V. .

118. Schwartz, M. (1992). *Composite Materials Handbook, 2nd Ed.* New York: McGraw hill.

119. Schwartz, M. (1997). *Composite Materials, Volume 1: Properties, Nondestructive Testing and Repair.* New York: Prentice Hall.

120. Schwartz, M. M. (1984). *Composite materials handbook“.* McGraw-Hill.

121. Shembekar, P., & Naik, N. (1992). Elastic Behavior of Woven Fabric Composites: II—Laminate Analysis. *Journal of Composite Materials*.

122. Shishoo, R. L. (1997). *Indian J Fibre Text Res, 22* , 213-221.

123. Siddhartha, & K, G. (2012). Mechanical and abrasive wear characterization of bidirectional and chopped E-glass fiber reinforced composite materials. *Materials & Design, vol. 35,*, 467-479.

124. Škundrić, P., Kostić, M., Medović, A., Mihailović, T., Asanović, K., & Sretković, L. (2008). *Tekstilni materijali.* Beograd: Tehnološko-metalurški fakultet .

125. Soden, J., & Hill, J. (1998). Conventional Weaving of Shaped Preforms for Engineering Composites . *Composites Part A, Vol.29A*, 757–762.

126. Soden, P., Kitching, R., Tse, P., & Tsavalas, Y. (1992). Influence of Winding Angle on the Strength and Deformation of Filament Wound Composite Tubes Subjected to Uniaxial and Biaxial Loads. *Composites Science and Technology, Vol 46*, 363-378.

127. Soden, P., Kitching, R., Tse, P., & Tsavalas, Y. (1993). Influence of winding angle on the strenght and deformation of filament wound composite tubes subjected to uniaxial and biaxial loads. *Composites Science and Technology*, 363-378.

128. Sondhelm, W. S. (2000). In S. C. Anand, *Handbook of Technical Textiles* (pp. 62-94). Cambridge: Woodhead Cambridge.

129. *SP Systems Guide to Composites* (2018). Преземено на 18 септември 2017 г: http://www.composites.ugent.be/home_made_composites/documentation/SP_Composites_Guide.pdf

130. Sproull, J. (1985). *U.S. Patent No. 4,542,106.*

131. Srebrenkoska, V. (2002). *Obtaining and characterization of composite material base on ablative phenolic resin and carbon fibers.* Masters Thesis Skopje, R. Macedonia: Faculty of Technology and Metallurgy, St. Cyril and Methodius University.

132. Srebrenkoska, V., Risteska, S., Mijajlovikj, M., Srebrenkoska, S., & Zhezhova, S. (2016). Mechanical and thermal properties of filament wound composite pipes. *VII International Metallurgy Congress, Metallurgy, Materials and Environmental*, (p. 69). Ohrid, Macedonia.

133. Srebrenkoska, V., Zhezhova, S., & Naseva, S. (2015). Hoop tensile properties of filament wound pipes. *Machines, Technologies, Materials, 11* , 28-31.

134. Tan, P., Tong, L., & Steven, G. P. (1997). Modelling for predicting the mechanical properties of textile composites -A review. *Composite Part A*, 903-922.

135. Turto, K., Berg, T., & Vuorinen, J. (2009). Influence of the fibre tension on the properties of the filament wound tubes,. *Sample Europe 30 Internationa lJubilee Conference and forum. SEICO 09*, 635-641.

136. U.S. Congress, Office of Technology Assessment (1988). *Advanced Materials by Design, OTAE-351.* Washington, DC: U.S. Government Printing Office.

137. Wallenberger, F. (1999). Structural Silicate and Silica Glass Fibers. In F. Wallenberger, & Ed., *Advanced Inorganic Fibers Processes, Structures, Properties, Applications* (pp. 129– 168). Kluwer Academic Publishers.

138. Wallenberger, F. (2010). Commercial and Experimental Glass Fibers. In F. Wallenberger, & P. A. Bingham, *Fiberglass and Glass Technology, Energy-Friendly Compositions and Applications* (pp. 3-90). Springer.

139. Wallenberger, F. T. (1995). The structure of glasses. *Science*, 267, 1549.

140. Wallenberger, F. T., Watson, J. C., Li, H., & PPG Industries, I. (2001). Glass Fibers . *ASM Handbook, Vol. 21: Composites*.

141. Wang, R.-M., & Zheng, S.-R. (2011). *Polymer Matrix Composites and Technology.* Woodhead Publishing.

142. Wiley. (2011). *Processing and finishing of polymeric materials.* John Wiley & Sons, inc publications.

143. Williams, G., & Wool, R. (2000). *Appl. Comp. Mater., 7*, 421.

144. Wolf, C. J. (2000). Composite Materials, Thermoplastic Polymer-Matrix. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology.*

145. Zahari, R., Azmee, A., Mustapha, F., Salit, M., Varatharajoo, R., & Shakrine, A. (2008). Prediction of progressive failure in woven glass/epoxy composite laminated panels. *Jurnal Mekanikal*, 80-91.

146. Zănoagă, M., & Tanasă, F. (2014). *Complex textile structures as reinforcment for advanced composite materials.* Brasov: International conference of scientific paper.

147. Антиќ, Б., Антиќ, А., & Зафирова, К. (1985). *Преплетки кај ткаенините.* Скопје: Просветно дело.

148. Димески, Д., & Сребренкоска, В. (2014). *Механички својства на текстилни материјали.* Штип: Универзитет "Гоце Делчев", Технолошко-технички факултет.

149. Зафирова, К., & Томовска, Е. (2011). *Технологија на ткаење.* Р. Македонија: Министерство за образование и наука на Р. Македонија.

150. Сребренкоска, В., Димески, Д., & Богоева Гацева, Г. (2013). Композитни материјали. In Е. Фиданчевска, & В. Сребренкоска, *Инжинерство на материјали.* Скопје: Национална и универзитетска библиотека "Св. Климент Охридски", Скопје.

8. ЛИСТА НА ТАБЕЛИ (LIST OF TABLES)

Табела 2. 1 Различни нивоа на текстилни структури за композити.................... 12
Табела 2. 2 Систем на класификација на 3Д ткаенините според Khokar, 2001. 15
Табела 2. 3 3Д ткаени текстилни структури (Chen, 2007).................................. 16
Табела 2. 4 Споредба помеѓу различните техники за производство на текстилен материјал, (Sondhelm, 2000).. 17
Табела 2. 5 Механички карактеристики на некои зајакнувачки влакна, (SP Systems Guide to Composites, 2018).. 20
Табела 2. 6 Типови на стаклени влакна 22
Табела 2. 7 Состав на некои видови комерцијални стаклени влакна 26
Табела 2. 8 Механички и физички својства на некои видови комерцијални стаклени влакна.. 28
Табела 2. 9 Номенклатура на филаментите според дијаметарот 38
Табела 2. 10 Споредба на својствата на ткаенините според типот на преплет (Ogale и Alagirusamya, 2003).. 45
Табела 2. 11 Споредбена анализа на термореактивните и термопластичните матрици 47
Табела 2. 12 Механички својства на некои епоксидни смоли 54
Табела 2. 13 Предности и недостатоци на процесот на рачно положување..... 59
Табела 2. 14 Некои апликации на процесот на рачно положување 60
Табела 2. 15 Предности и недостатоци на примената на препрези.................. 62

Табела 4. 1 Технички карактеристики на зајакнувачката компонента EC1200 P185 84
Табела 4. 2 Карактеристики на компонентите на смолниот систем 85
Табела 4. 3 Соодност на компонентите 85
Табела 4. 4 Карактеристики на смолниот систем 86
Табела 4. 5 Карактеристики на компонентите на смолниот систем 96
Табела 4. 6 Технички карактеристики на Е - стаклените ткаенини..................... 98
Табела 4. 7 Технички карактеристики на Е – стаклен неткаен текстил............ 102
Табела 4. 8 Технички карактеристики на Е - унидирекционален стаклен препрег 102
Табела 4. 9 Редослед на изработка на пакетите од препрег........................... 104
Табела 4. 10 Услови на изработка на композитните плочи.............................. 108

Табела 5. 1 Масени и волуменски удели на конституентите и теоретска густина на композитните примероци 115
Табела 5. 2 Основни карактеристики на прстенестите тест примероци 117
Табела 5. 3 Резултати за крајна јачина на истегнување од сплит - диск тестовите 118
Табела 5. 4 Структурни карактеристики на Е - стаклените ткаенини 128
Табела 5. 5 Површинска маса на Е- стаклените ткаенини............................... 129
Табела 5. 6 Механички карактеристики на користените Е- стаклени ткаенини133
Табела 5. 7 Масен удел на стаклена ткаенина и епоксидна смола во добиените композитни примероци... 138

Табела 5. 8 Волуменски удел на составните компоненти, теоретска, експериментална густина и процент на пори во композитните примероци 139
Табела 5. 9 Просечни вредности за масениот и волуменскиот удел на стаклената ткаенина и епоксидната смола и процент на пори кај композитните плочи..... 140
Табела 5. 10 Димензии на примероците за испитување на јачина на свиткување 142
Табела 5. 11 Добиени вредности при испитување на јачина на свиткување на композитните плочи зајакнати со платно ткаенина (примерок 1) 157
Табела 5. 12 Добиени вредности при испитување на јачина на свиткување на композитните плочи зајакнати со кепер ткаенина (примерок 2) 158
Табела 5. 13 Добиени вредности при испитување на јачина на свиткување на композитните плочи зајакнати со панама ткаенина (примерок 3)..................... 159
Табела 5. 14 Добиени средни вредности при испитување на јачина на свиткување на композитните плочи зајакнати со стаклена ткаенина 160
Табела 5. 15 Површинска маса на Е – стаклен неткаен текстил 164
Табела 5. 16 Масени и волуменски удели на составните компоненти, теоретска, експериментална густина и процент на пори во композитните примероци зајакнати со Е – стаклен неткаен текстил 166
Табела 5. 17 Јачина на свиткување на композитните плочи зајакнати со Е - стаклен неткаен текстил 172
Табела 5. 18 Масени и волуменски удели на составните компоненти, теоретска, експериментална густина и процент на пори во композитните примероци зајакнати со унидирекционални ленти 176
Табела 5. 19 Јачина на свиткување на композитните плочи зајакнати со унидирекционални ленти 182

9. ЛИСТА НА СЛИКИ (LIST OF FIGURES)

Слика 2. 1 Влијание на карактеристичниот однос l/d на честичките на зајакнувачот врз распределбата на напрегањата во матрицата: а) сферна честичка, l/d = 1; b) кратко крто влакно, l/d = 10-1000; c) бесконечно влакно, l/d = ∞ ... 10
Слика 2. 2 Типови на текстилен зајакнувач ... 14
Слика 2. 3 Молекулска структура на стакло составена од атоми на кислород и силициум ... 21
Слика 2. 4 Стаклен мат ... 34
Слика 2. 5 а) Стаклен ровинг б) Ткаен ровинг ... 35
Слика 2. 6 Стаклена ткаенина ... 39
Слика 2. 7 Платно преплет ... 40
Слика 2. 8 2x2 Кепер преплет ... 40
Слика 2. 9 а) Четири - жичен сатен б) Осум - жичен сатен ... 41
Слика 2. 10 Панама преплет ... 42
Слика 2. 11 Ленен преплет ... 42
Слика 2. 12 Лажна газа преплет ... 43
Слика 2. 13 Високо модулен преплет ... 43
Слика 2. 14 Унидирекционален преплет ... 44
Слика 2. 15 Крива напрегање/ деформација за "идеална" полимерна матрица 49
Слика 2. 16 Деформацијата до кинење за Е - стаклени, С - стаклени, арамидни и јаглеродни влакна со висока јачина ... 50
Слика 2. 17 Идеализирана хемиска структура на едноставна епоксидна смола (етилен оксид) ... 51
Слика 2. 18 Хемиски структури на некои од најчесто применуваните вмрежувачки агенси ... 53
Слика 2. 19 Хемиски структури на функционални и мултифункционални епоксидни смоли ... 55
Слика 2. 20 Рачно положување ... 58
Слика 2. 21 Различни видови на препрег материјали (Hexcel Corporation, 2013) ... 61
Слика 2. 22 Компресионо пресување (Encyclopædia Britannica, 2018) ... 63
Слика 2. 23 Шематски приказ на процесот на намотување на филаменти (Assaleh, 2011) ... 66
Слика 2. 24 а) Спирално намотување; б) Радијално намотување; в) Поларно намотување ... 71

Слика 4. 1 Производство на композитни цевки со различен агол на намотување (10°, 45° и 90°) на машина за намотување на филаменти MAW FB 6/1 ... 87
Слика 4. 2 Изглед на произведените композитни цевки ... 88
Слика 4. 3 Изглед на прстенест примерок за тестирање на јачината на истегнување ... 92
Слика 4. 4 Изглед на помошен алат заедно со примерокот за тестирање на јачината на истегнување ... 93

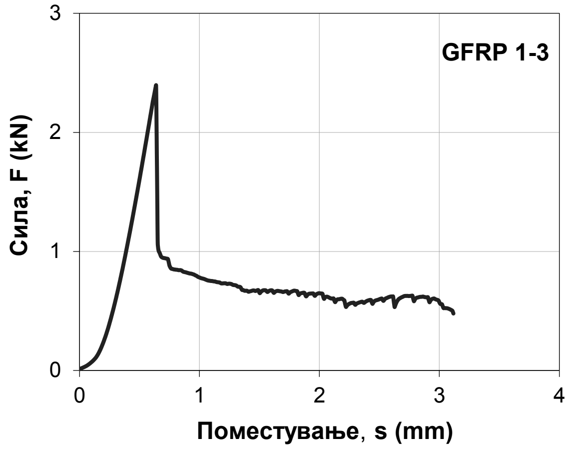
Слика 4. 5 Универзална машина за испитување на јачина на истегнување: а) Zwick/Roell Z050 со максимална сила од 50 KN и б) Zwick/Roell Z400 со максимална сила од 400 MPa.. 93
Слика 4. 6 Скенирачки електронски микроскоп VEGA3 LMU од фирмата Tescan 95
Слика 4. 7 Густината на ткаенината во правец на основата и јатокот 99
Слика 4. 8 Подготовка на примероци од ткаенините за испитување на јачината на кинење... 100
Слика 4. 9 Испитување на јачина на кинење на универзална машина за тестирање „Schenk“ 101
Слика 4. 10 Двокомпонентен смолен систем: епоксидна смола (D.E.R 3821) и вцврстувач (Polypox H 766)).. 104
Слика 4. 11 Нанесување на смола на примерок од Е - стаклена ткаенина 105
Слика 4. 12 Изглед на а) пакет од препрег I, III и V б) пакет од препрег II, IV и VI 106
Слика 4. 13 Прес апарат 107
Слика 4. 14 Стандардни епрувети за испитување на јачина на свиткување ... 110
Слика 4. 15 Испитување на јачината на свиткување со метода со три точки на свиткување.. 111
Слика 4 16 Тест примерок изложен на свиткување 112

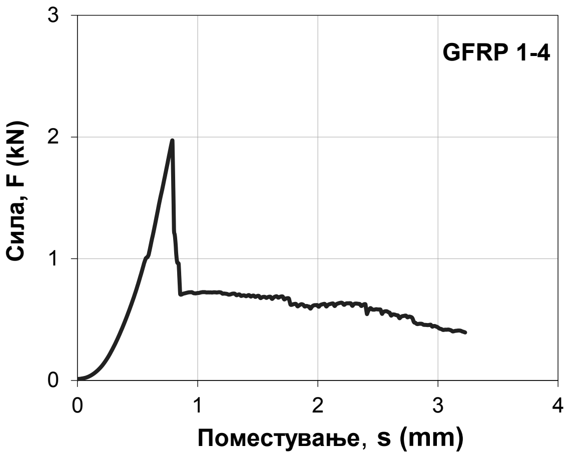
Слика 5. 1 Криви сила – поместување за прстенестите примероци серија 1-1 и 1-2 120
Слика 5. 2 Криви сила – поместување за прстенестите примероци серија 2-1 и 2-2 121
Слика 5. 3 Криви напрегање – деформација за прстенестите примероци 3-1 и 3-2 122
Слика 5. 4 Приказ на деструкцијата на композитните примероци со различен агол на намотување по испитување на јачината на истегнување 123
Слика 5. 5 СЕМ микрофотографии по фрактура на композитните прстенести примероци со агол на намотување од а) 10°, б) 45° и в) 90° 127
Слика 5. 6 Микрофотографии од а) примерок 1, б) примерок 2 и в) примерок 3 131
Слика 5. 7 Јачина на истегнување на Е - стаклените ткаенини по а) основа и б) јаток 134
Слика 5. 8 Горење на примероци од композитните плочи 136
Слика 5. 9 Микрофотографии од примерок со голем процент на пори 141
Слика 5. 10 Микрофотографии од примерок со мал процент на пори 141
Слика 5. 11 Определување на модул на еластичност за тест примерок I-1-1. 144
Слика 5. 12 Криви сила – поместување за тест примероците I-1-1 и I-1-5....... 145
Слика 5. 13 Криви сила – поместување за тест примероците I-2-1 и I-2-5....... 146
Слика 5. 14 Криви сила – поместување за тест примероците II-3-1 и II-3-5..... 147
Слика 5. 15 Криви сила – поместување за тест примероците II-4-1 и II-4-5..... 148
Слика 5. 16 Криви сила – поместување за тест примероците III-1-1 и III-1-5... 149
Слика 5. 17 Криви сила – поместување за тест примероците III-2-1 и III-2-5... 150
Слика 5. 18 Криви сила – поместување за тест примероците IV-3-1 и IV-3-5.. 151
Слика 5. 19 Криви сила – поместување за тест примероците IV-4-1 и IV-4-5.. 152

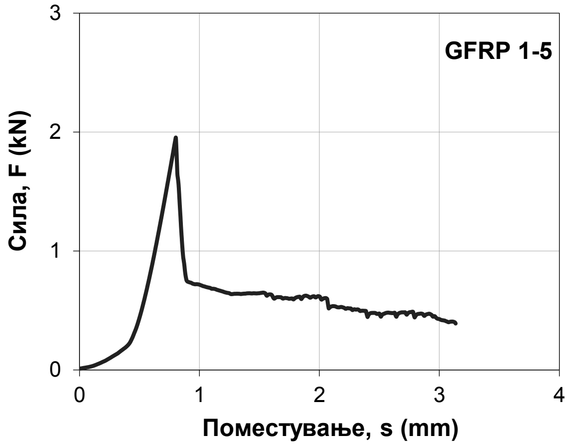
Слика 5. 20 Криви сила – поместување за тест примероците V-1-1 и V-1-5.... 153
Слика 5. 21 Криви сила – поместување за тест примероците V-2-1 и V-2-5.... 154
Слика 5. 22 Криви сила – поместување за тест примероците VI-3-1 и VI-3-5.. 155
Слика 5. 23 Криви сила – поместување за тест примероците VI-4-1 и VI-4-5.. 156
Слика 5. 24 Напрегање при свиткување на композитни плочи зајакнати со текстил добиени при притисок од 30 bar 161
Слика 5. 25 Напрегање при свиткување на композитни плочи зајакнати со текстил добиени при притисок од 40 bar 161
Слика 5. 26 Изглед на примероците пред и после процесот на горење а) Стаклен мат/ епоксид пресуван при 30 bar б) Стаклен мат/ епоксид пресуван при 40 bar 165
Слика 5. 27 Криви сила– поместување за тест примероците VII-1-1 и VII-1-5. 168
Слика 5. 28 Криви сила– поместување за тест примероците VII-2-1 и VII-2-5. 169
Слика 5. 29 Криви сила– поместување за тест примероците VIII-3-1 и VIII-3-5170
Слика 5. 30 Криви сила– поместување за тест примероците VIII-4-1 и VIII-4-5171
Слика 5. 31 Напрегање при свиткување на композитните плочи зајакнати со Е-стаклен неткаен текстил добиени при притисок од 30 и 40 bar 173
Слика 5. 32 Криви сила– поместување за тест примероците IX-1-1 и IX-1-5... 178
Слика 5. 33 Криви сила– поместување за тест примероците IX-2-1 и IX-2-5... 179
Слика 5. 34 Криви сила – поместување за тест примероците X-3-1 и X-3-5.... 180
Слика 5. 35 Криви сила – поместување за тест примероците X-4-1 и X-4-5.... 181
Слика 5. 36 Напрегање при свиткување на композитните плочи зајакнати со унидирекционали ленти добиени при притисок од 30 и 40 bar........................ 183
Слика 5. 37 Напрегање при свиткување на композитните структури зајакнати со текстил во различни форми добиени при притисок од 30 bar.......................... 184
Слика 5. 38 Напрегање при свиткување на композитните структури зајакнати со текстил во различни форми добиени при притисок од 40 bar.......................... 185

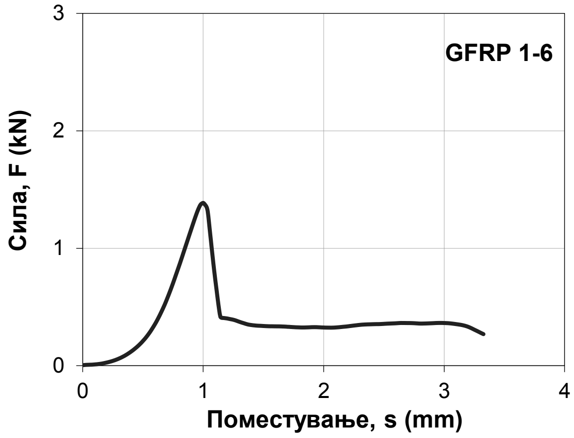
10. ПРИЛОЗИ (APPENDIXES)

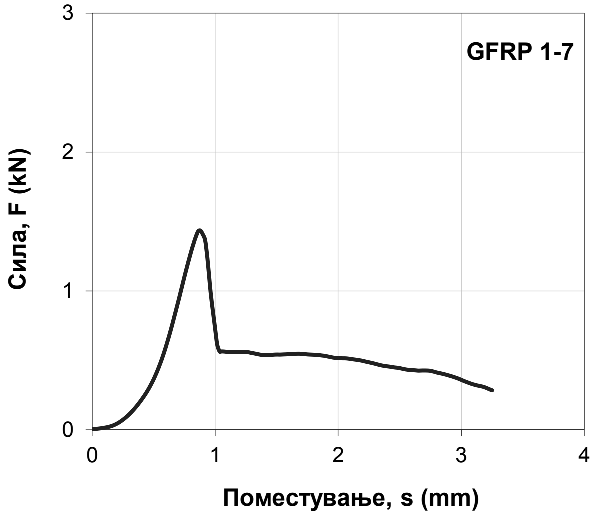
Прилог 10.1 Криви сила – поместување за прстенестите примероци серија 1.3-1.7



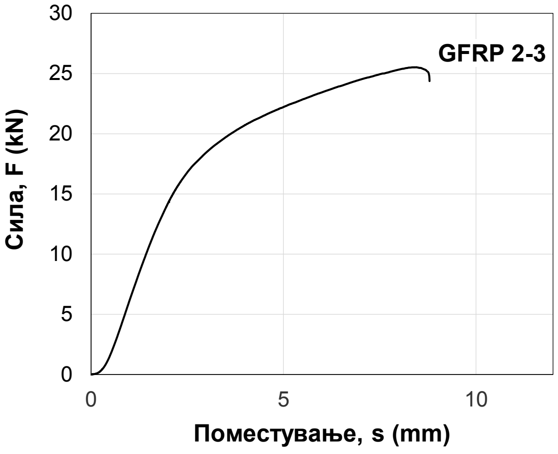


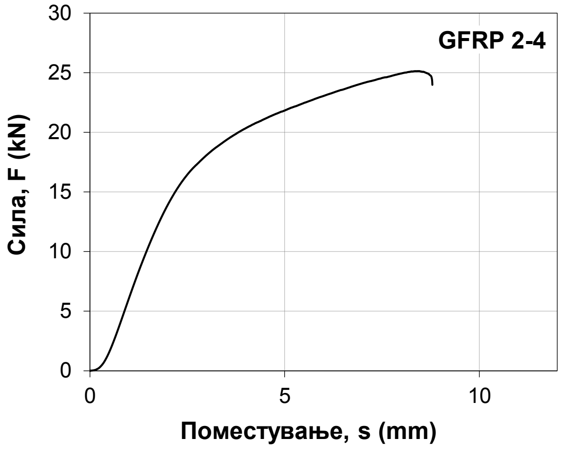


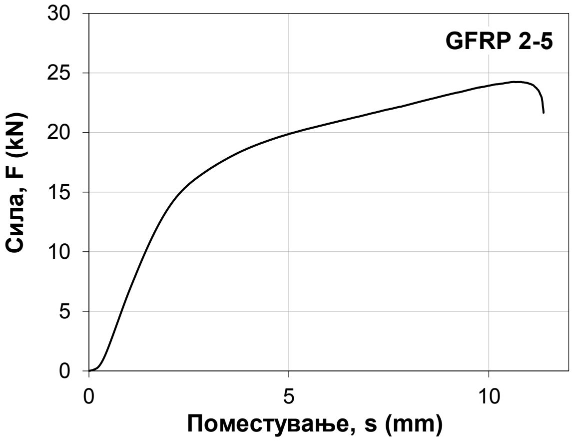


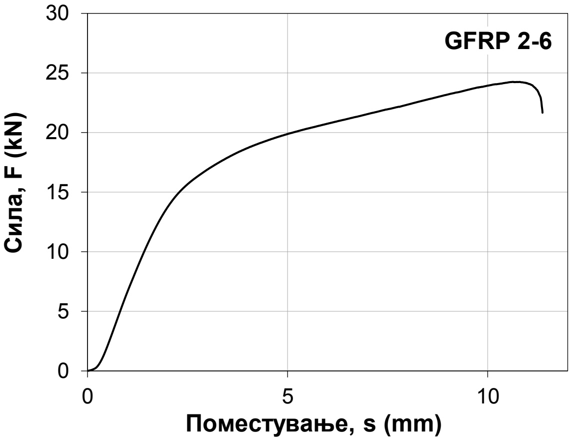


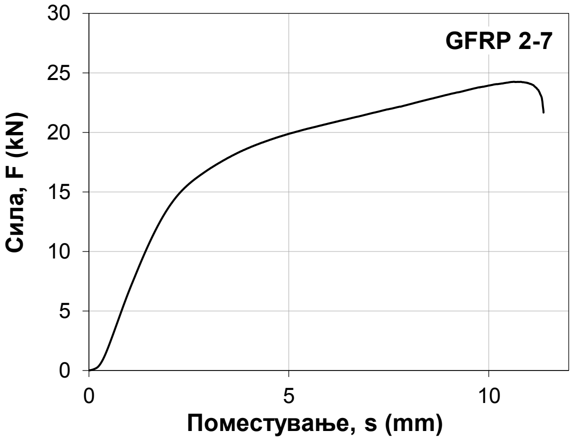
Прилог 10.2 Криви сила – поместување за прстенестите примероци серија 2.3-2.7



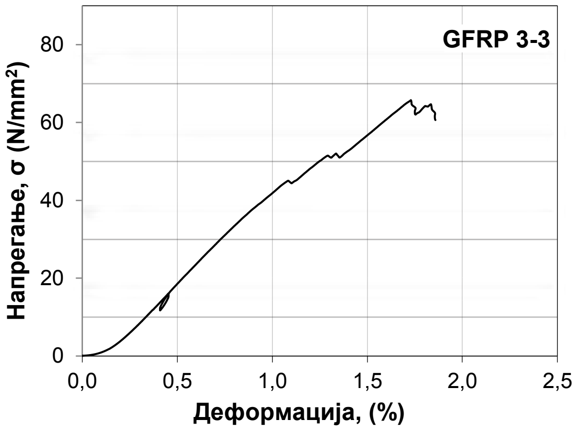


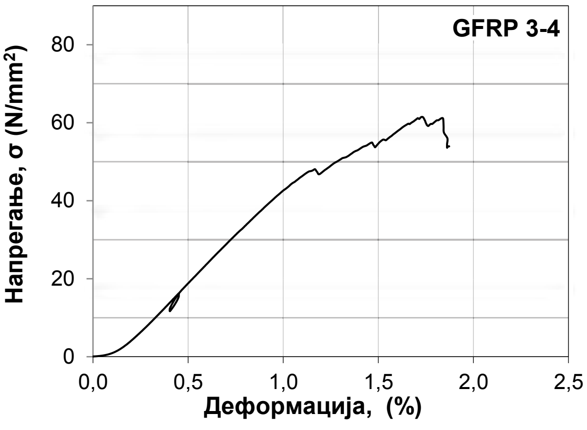


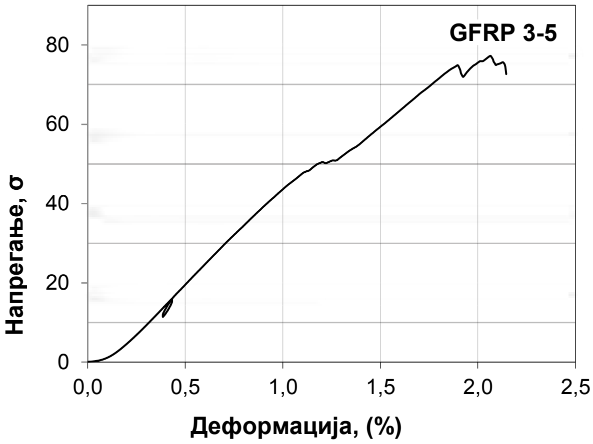


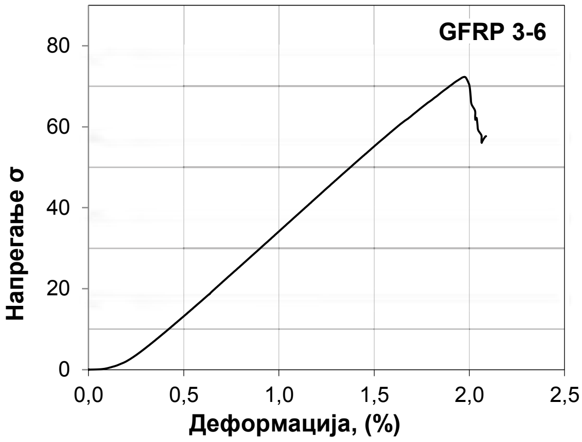


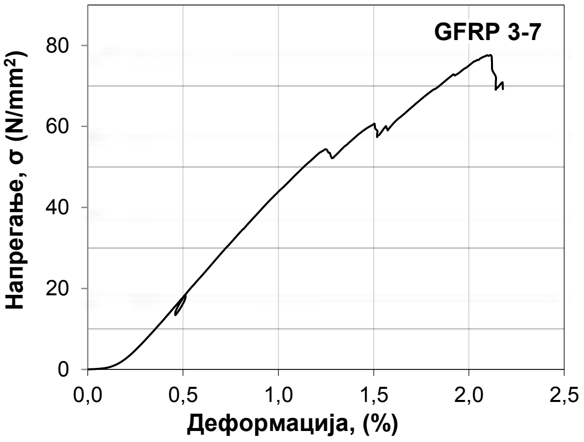
Прилог 10.3 Криви напрегање – деформација за прстенестите примероци серија 3.3-3.7



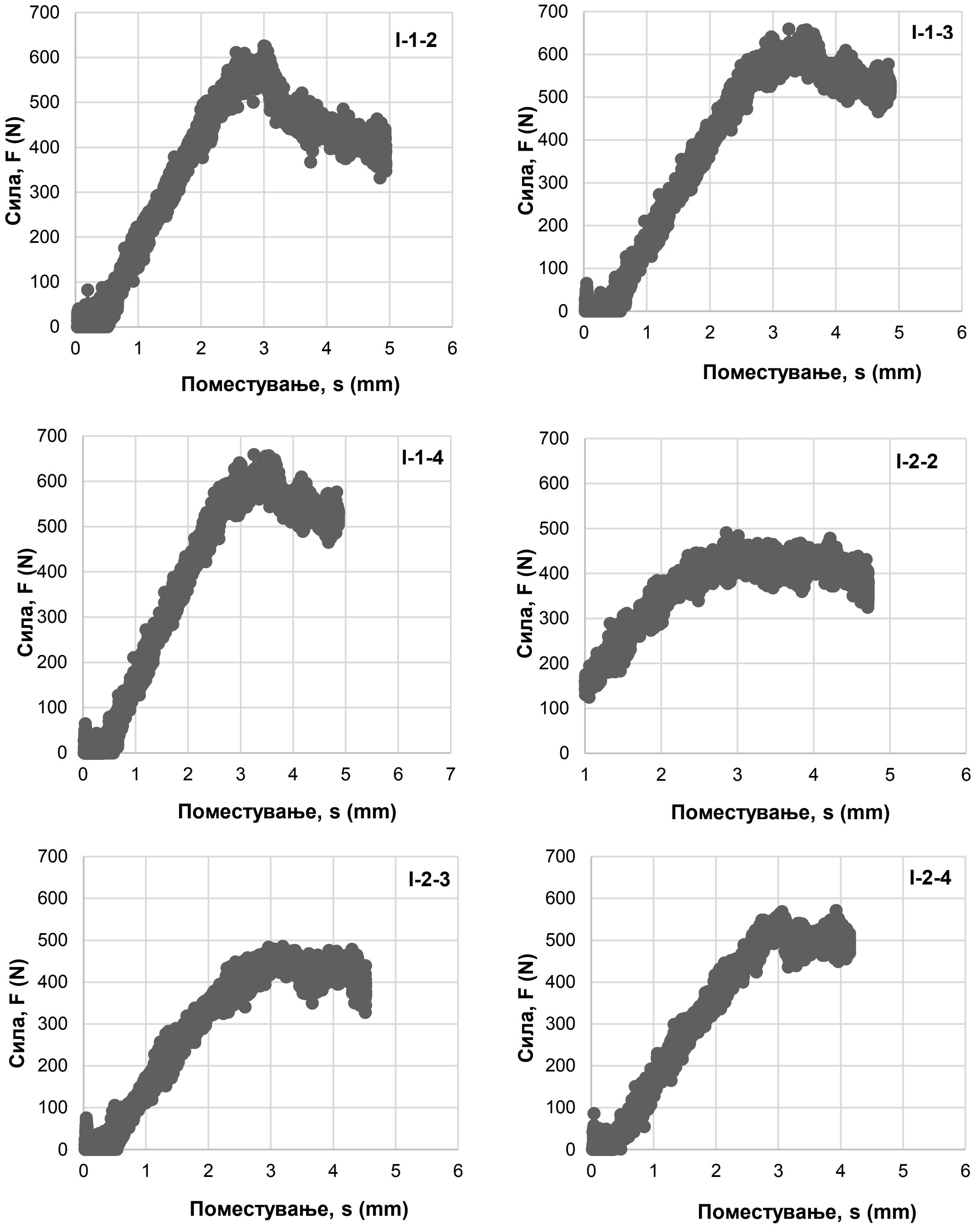




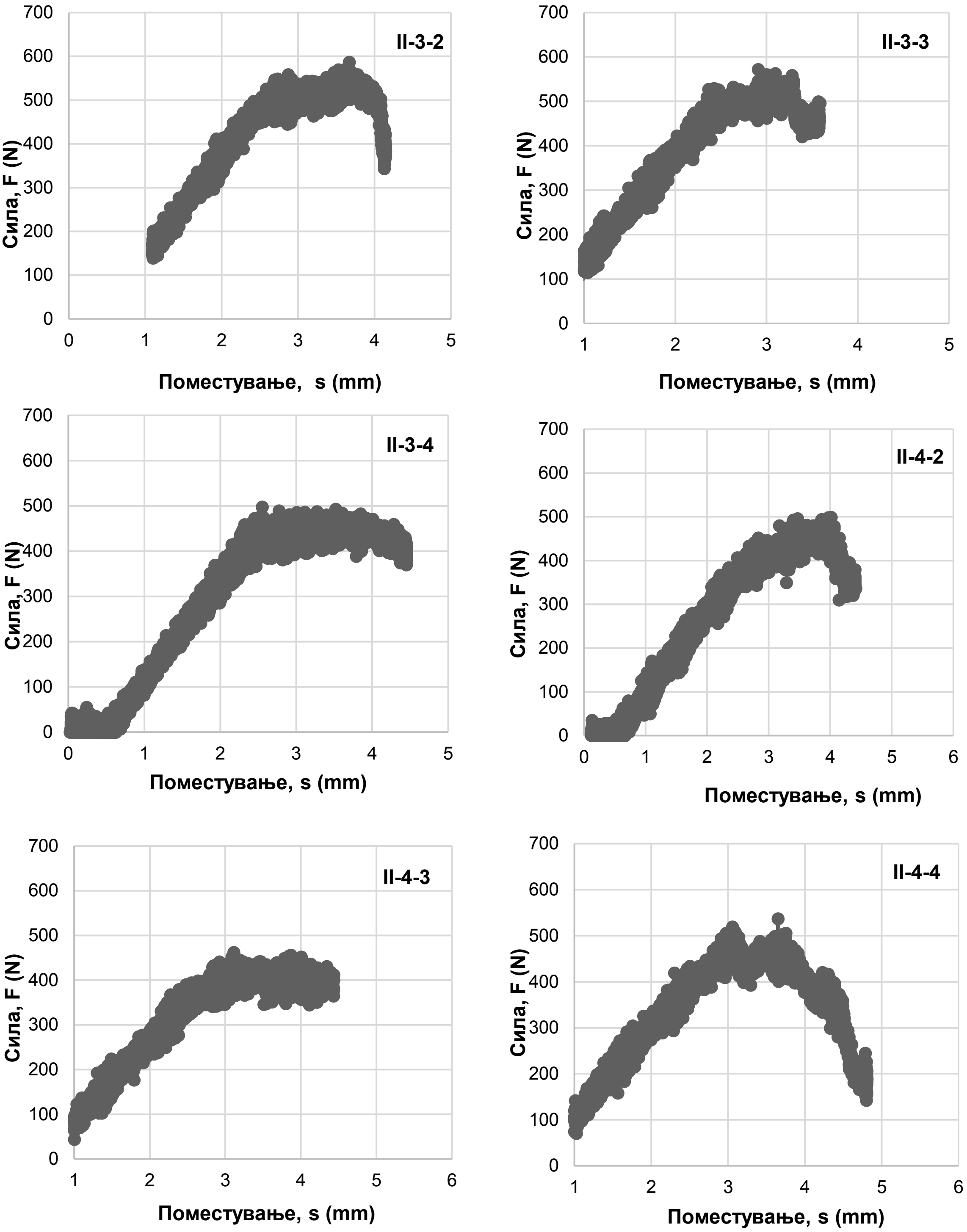




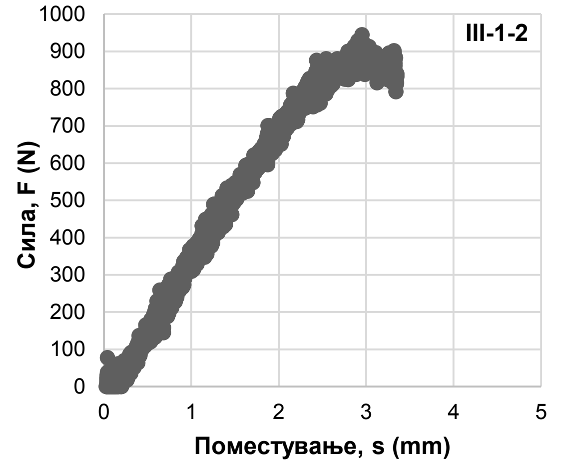
Прилог 10.4 Криви сила – поместување за композитните примероци зајакнати со платно ткаенина пресувани при притисок од 30 bar

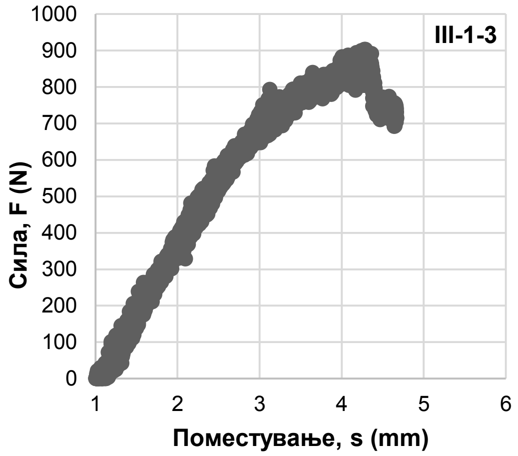


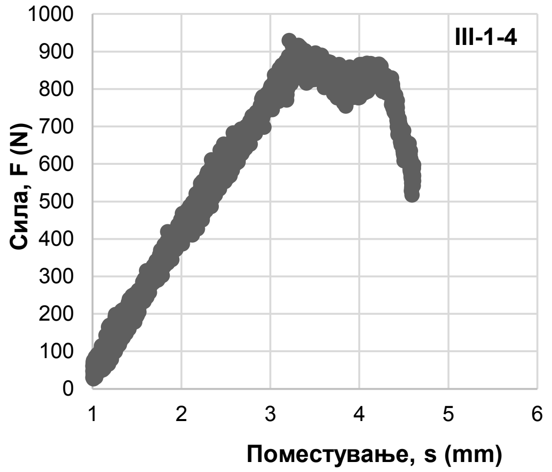
Прилог 10.5 Криви сила – поместување за композитните примероци зајакнати со платно ткаенина пресувани при притисок од 40 bar

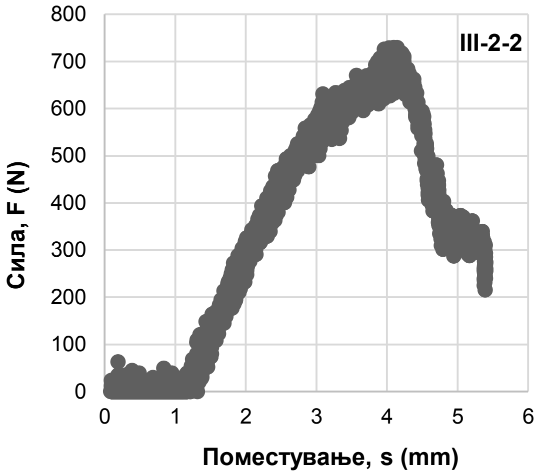


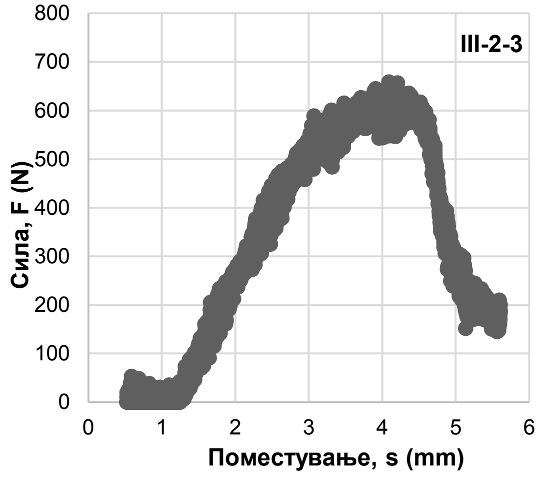
Прилог 10.6 Криви сила – поместување за композитните примероци зајакнати со кепер ткаенина пресувани при притисок од 30 bar

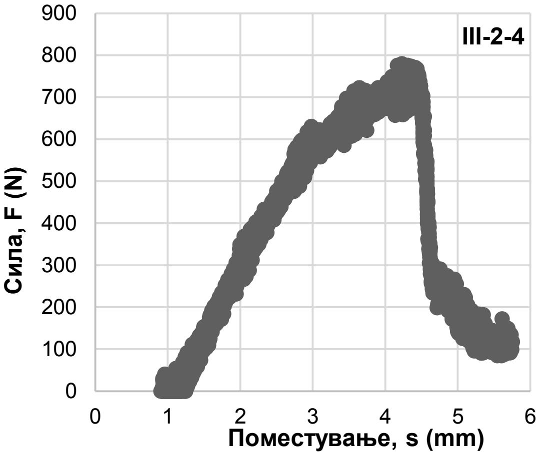




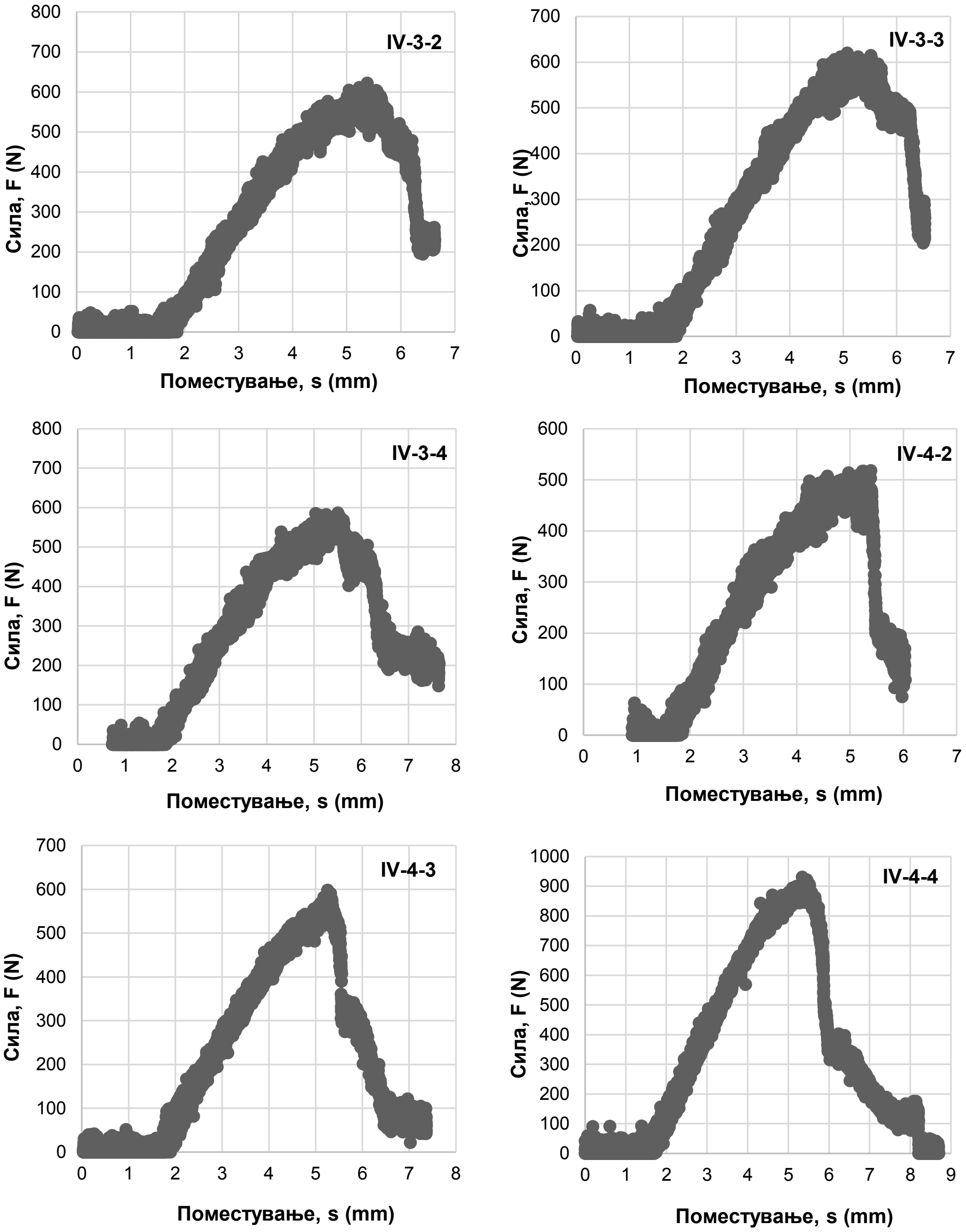




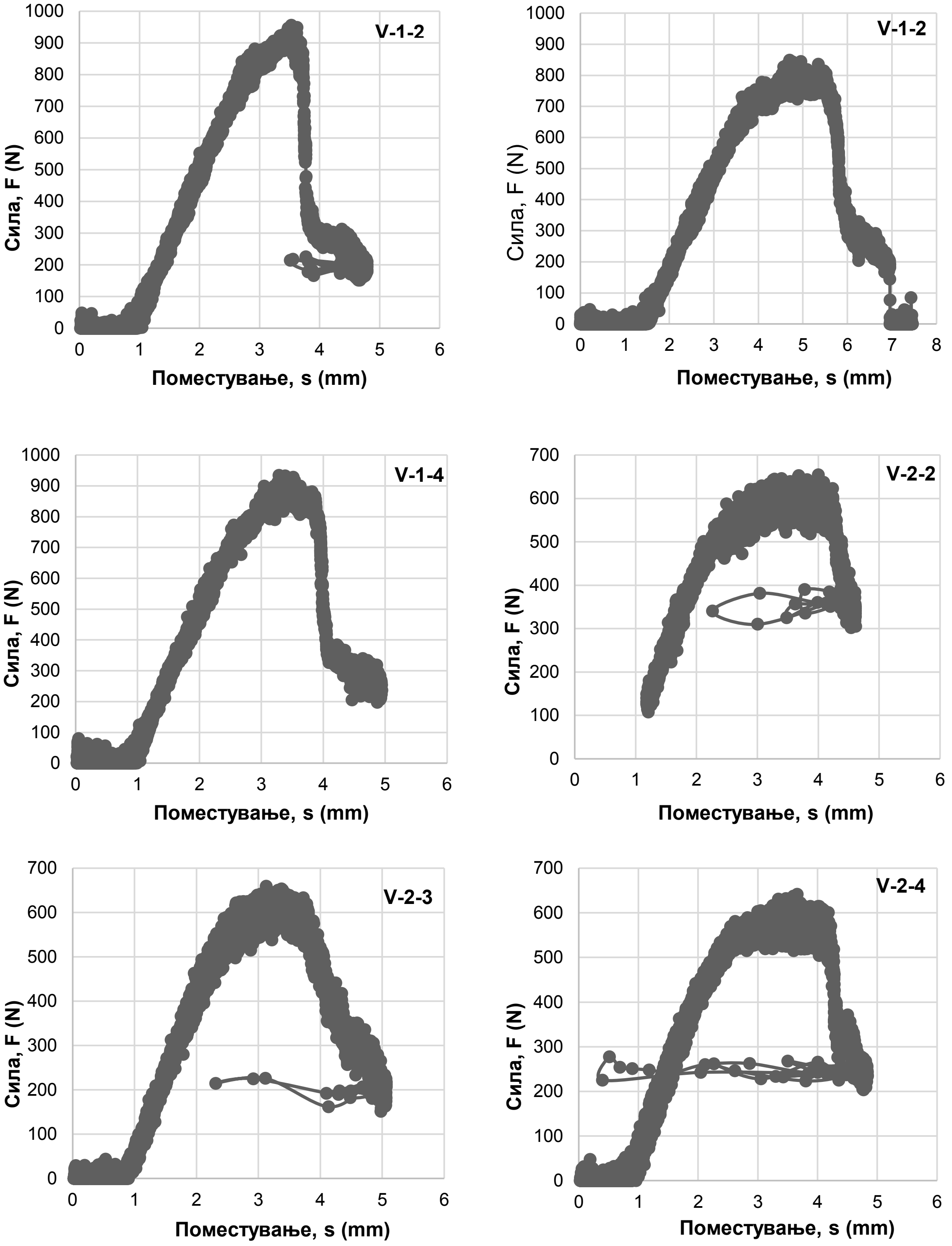




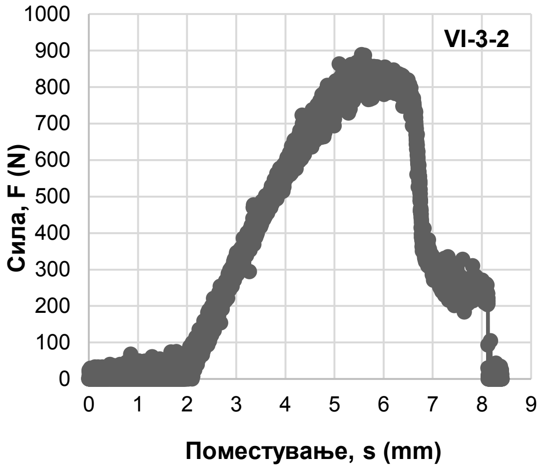
Прилог 10.7 Криви сила – поместување за композитните примероци зајакнати со кепер ткаенина пресувани при притисок од 40 bar

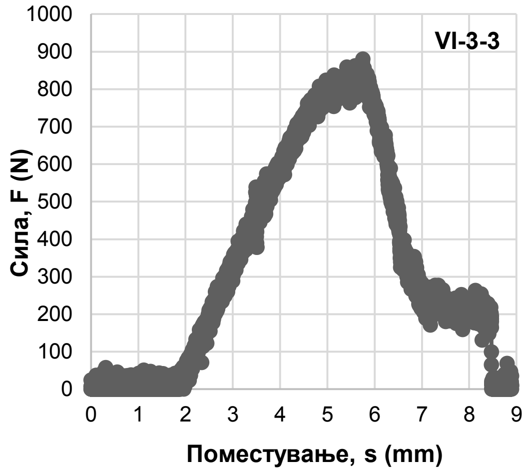


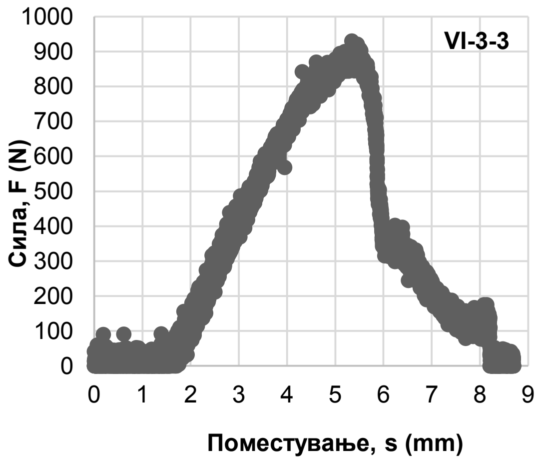
Прилог 10.8 Криви сила – поместување за композитните примероци зајакнати со панама ткаенина пресувани при притисок од 30 bar

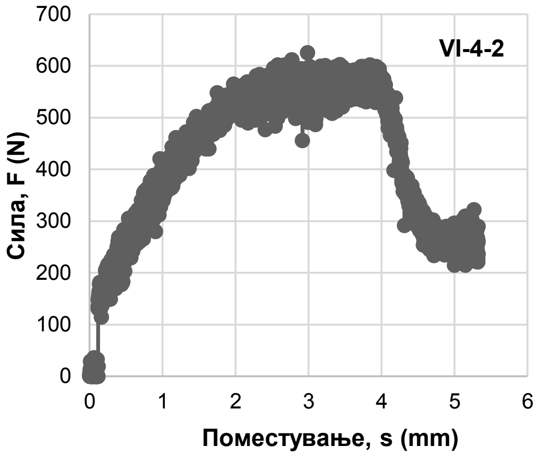


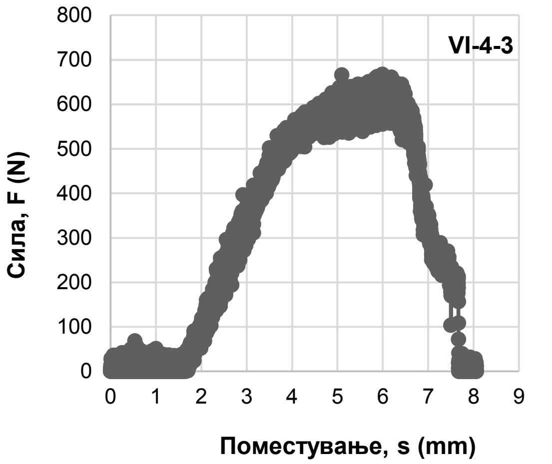
Прилог 10.9 Криви сила – поместување за композитните примероци зајакнати со панама ткаенина пресувани при притисок од 40 bar

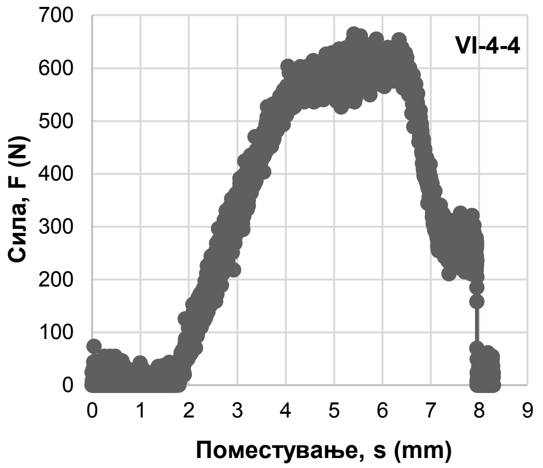




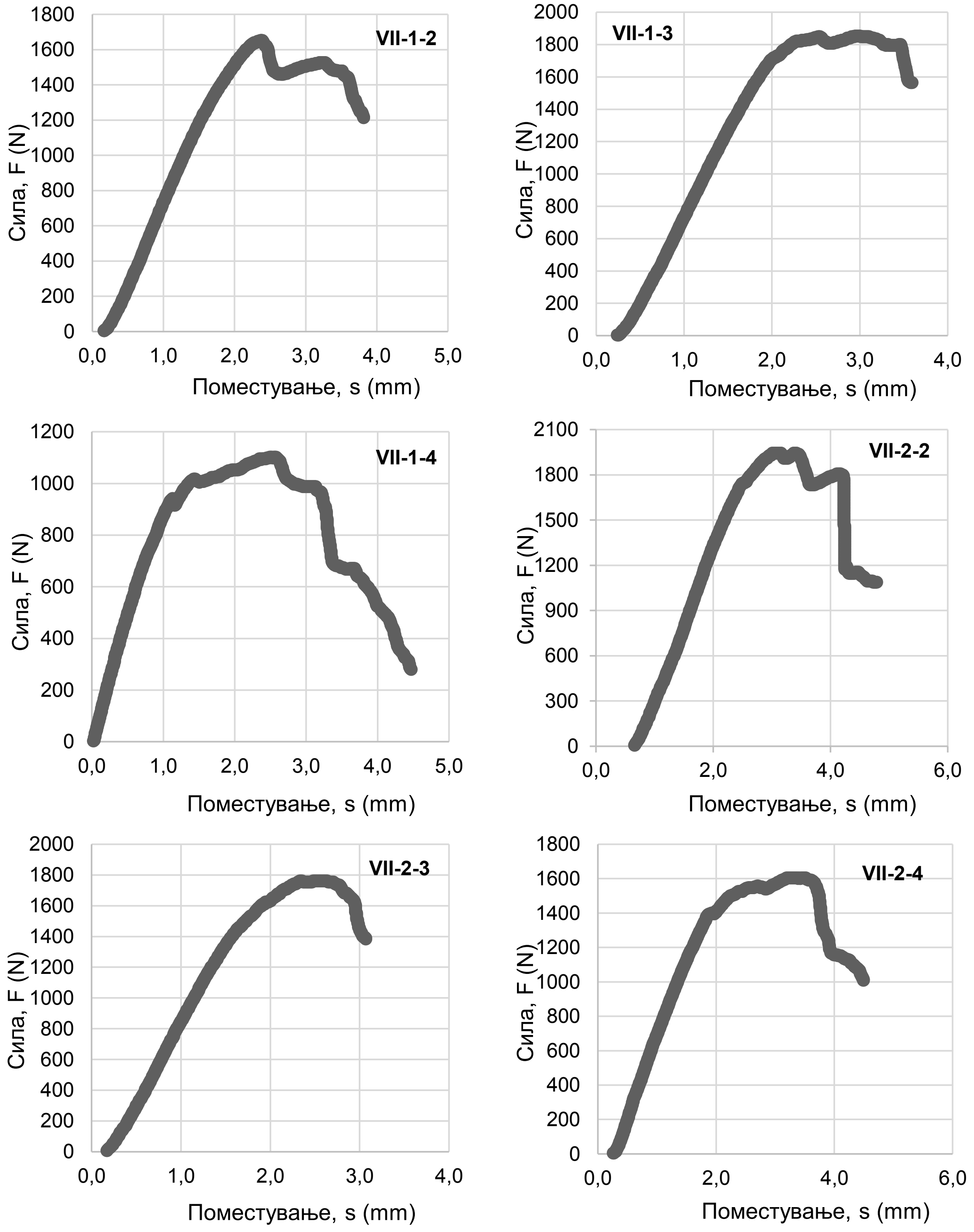




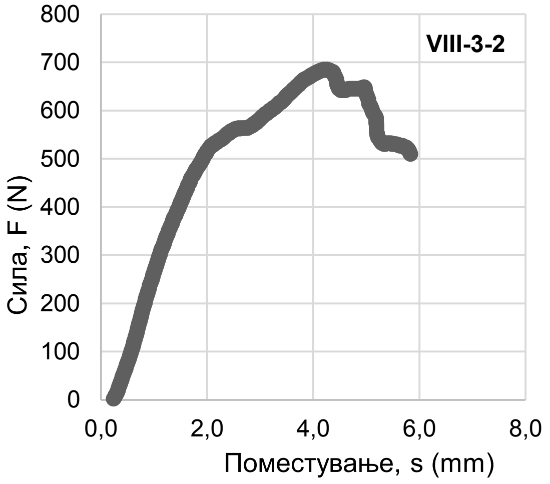


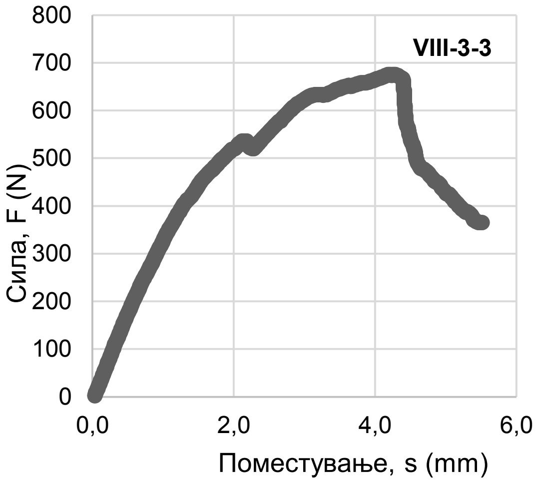


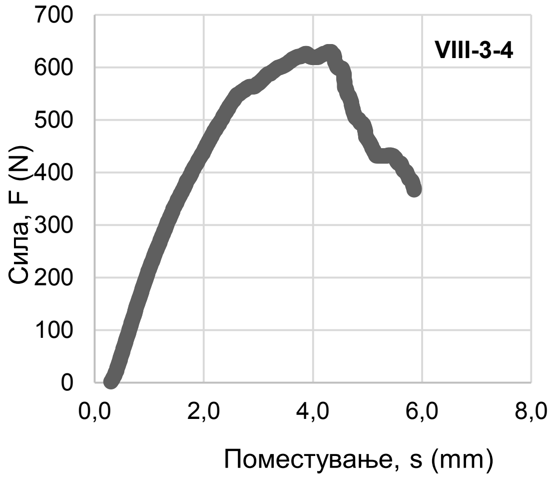
Прилог 10.10 Криви сила – поместување за композитните примероци зајакнати со Е - стаклен неткаен текстил пресувани при притисок од 30 bar

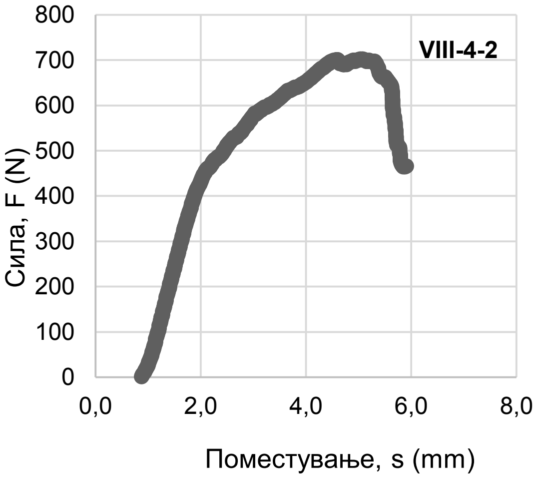


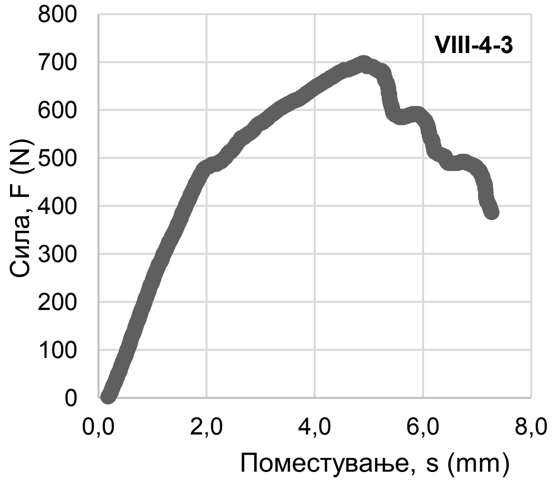
Прилог 10.11 Криви сила – поместување за композитните примероци зајакнати со Е - стаклен неткаен текстил пресувани при притисок од 40 bar

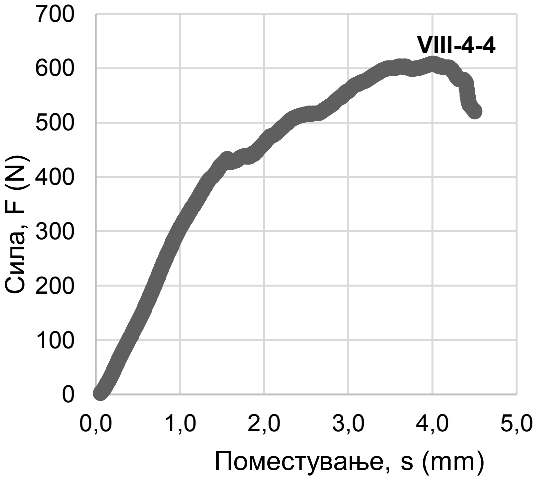




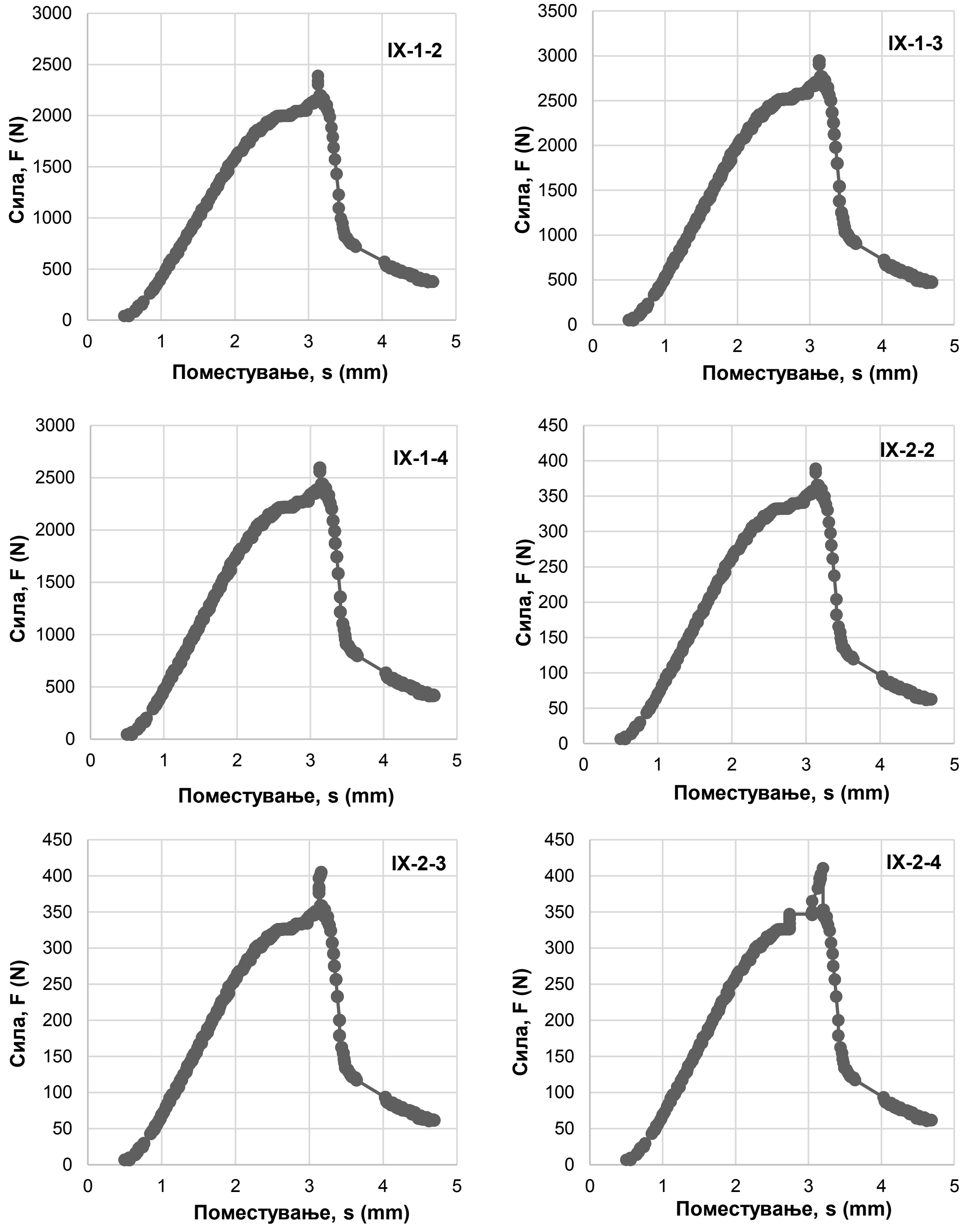
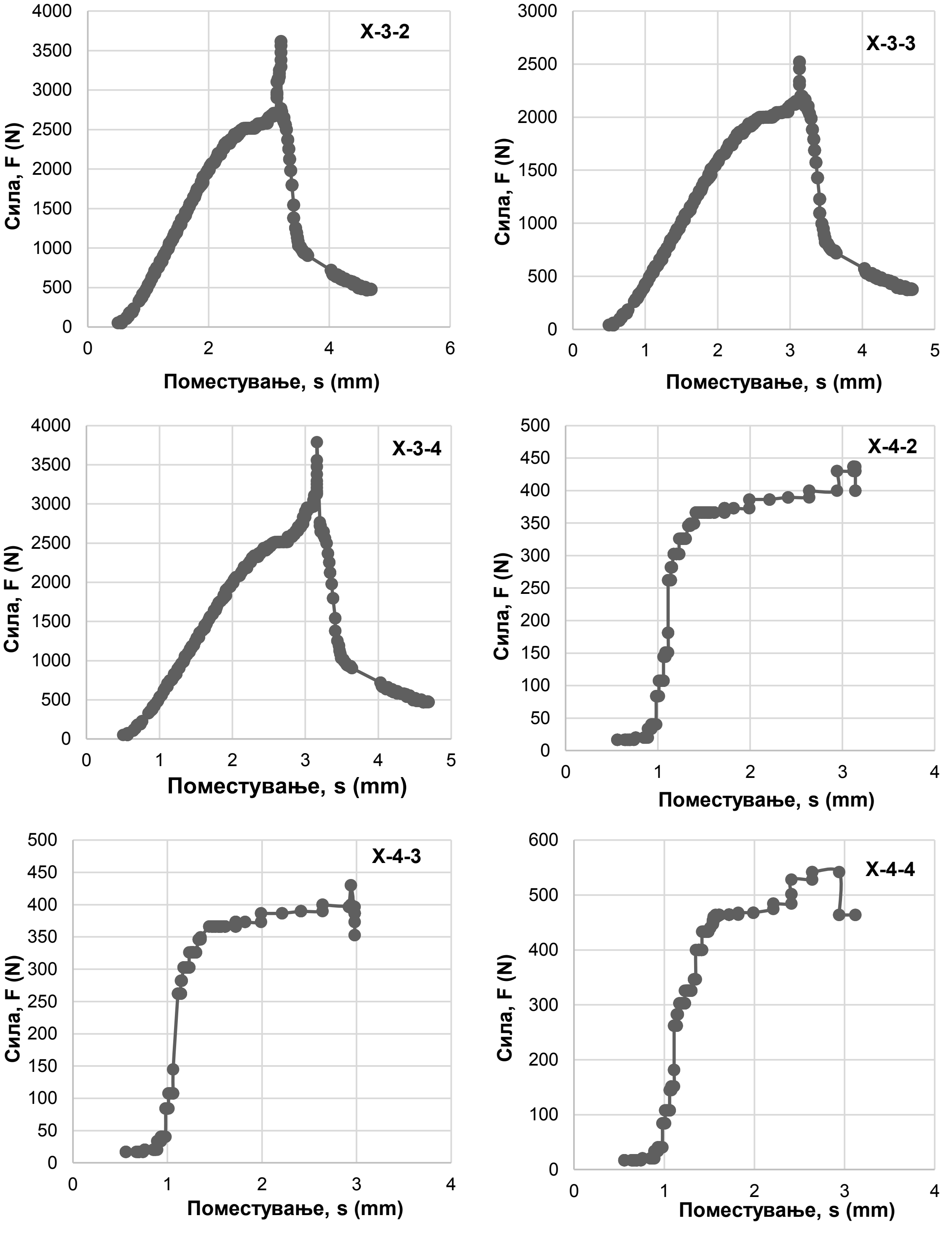








Прилог 10.12 Криви сила – поместување за композитните примероци зајакнати со унидирекционални ленти пресувани при притисок од 30 bar



Прилог 10.13 Криви сила – поместување за композитните примероци зајакнати со унидирекционални ленти пресувани при притисок од 40 bar