



**УНИВЕРЗИТЕТ „ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ“-ШТИП**  
**ТЕХНОЛОШКО-ТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ-ПРОБИШТИП**  
**ИНДУСТРИСКИ ДИЗАЈН НА ТЕКСТИЛ**

**Билјана Поп Методиева**

**ПРИМЕНА НА СТАКЛЕНИ ВЛАКНА ВО ТЕХНОЛОГИЈА ЗА НАМОТУВАЊЕ НА  
ФИЛАМЕНТИ: ДИЗАЈН И АНАЛИЗА НА ПРОЦЕС**

**МАГИСТЕРСКИ ТРУД**

**Штип, септември 2017**

**Билјана Поп Методиева**

**Примена на стаклени влакна во технологија за намотување на филаменти:  
дизајн и анализа**

**Универзитет „Гоце Делчев“ - Штип**

## **Комисија за оценка и одбрана**

**Ментор:**

**Д-р Винета Сребренкоска**

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

**Член:**

**Д-р Димко Димески**

Вонреден 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,

**Научно поле:** Текстилно инженерство (223)

**Научна област:** Текстилни и технички влакна (22300),  
Хемија на текстилот (22302)

**Датум на одбрана:** 27.09.2017

## ПОСВЕТА И БЛАГОДАРНОСТ

Огромана благодарност на мојот ментор и **проф. д-р Винета Сребренкоска**, за целосната ангажираност, укажаната помош, стручните совети, како и насоките и изборот на методите за работа. Огромна благодарност за нејзината организација и овозможениот пристап и контакт со Институтот за современи композити и роботика во Прилеп, така што успејме во целосната реализацијата на овој магистерски труд.

Благодарност, до „**Институтот за современи композити и роботика**“ во Прилеп за излегување во пресрет на моето истражување и несебичната соработка со вработените.

Благодарност, на сите оние кои на било каков начин помогнаа во реализацијата на трудот.

Благодарност, до мојот сопруг и моите деца, за љубовта, вербата и моралната поддршка која постојано ми ја укажуваа.

## Рецензирани и објавени трудови

1. 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
2. Pop Metodieva, Biljana and Srebrenkoska, Sara and Srebrenkoska, Vineta (2015) [The design of glass fiber//epoxy composite pipes by the implementation of the full factorial experimental design.](#) Quality of Life, 6 (3-4). pp. 83-87. ISSN 1986-602X (print); 1986-6038 (online)
3. Pop Metodieva, Biljana and Zhezhova, Silvana and Srebrenkoska, Vineta and Naseva, Simona and Srebrenkoska, Sara (2015) [Design of polymer composite pipes produced by filament winding technology.](#) In: XII International Congress Machines, Technologies, Materials 2015, 16-19 Sept 2015, Varna, Bulgaria.

## ПРИМЕНА НА СТАКЛЕНИ ВЛАКНА ВО ТЕХНОЛОГИЈА ЗА НАМОТУВАЊЕ НА ФИЛАМЕНТИ: ДИЗАЈН И АНАЛИЗА НА ПРОЦЕС

### Краток извадок

Во овој магистерски труд направено е истражување за производство на композитни цевки. Користени сестаклени влакна како зајакнувачки материјал и епоксидна смола како полимерна матрица. Композитните цевки се произведени во точно определени услови со примена на методот за намотување на филаменти.

Направено е дизајнирање на процесот преку примена на полн три факторен експеримент со земање на три фактори кои најмногу влијаат на процесоти со нивно менувањена две нивоа: минимална и максимална вредност. Земени се следните фактори односно параметри на процесот: брзина на намотување, јачина на истегнување и агол на намотување на влакната. Врз основа на план матрицата направени се 8 експерименти со менување на трите фактори на две нивоа ( $2^3$ ). Добиени се 8 различни примероци – композитни цевки и за сите е определена јачината на компресија.

Врз основа на добиените резултати добиена е адекватна регресиона равенка која најдобро го опишува влијанието на избраните фактори врз јачината на компресија односно врз отпорноста на цевките се до нивна целосна деструкција. Од добините резултати и регресионата равенка добиен е заклучокот 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. Аголот на намотување се покажа дека има големо влијание врз отпорноста на композитните цевки на компресија. Имено, аголот на намотување влијае обратнопропорционално врз јачината на компресија. Добиените резултати се од голема важност за примената на композитните цевки добиени со методот на намотување на филаменти, а особено кога од материјалот се бара да има мала специфична маса, а голема јачина на компресија.

**Клучни зборови:** дизајн на експерименти, намотување на филаменти, композитни цевки, јачина на компресија.

## Abstract

In this work is made research of composite tubes production. Used as glass fiber reinforcements and epoxy resin as polymeric matrix. The composite tubes are produced under specified conditions by applying the method of winding filaments.

Design has been made of the process through the application of three full factorial experiment taking three factors that influence the process. The factors will change in two levels: minimum and maximum value. Will changing the factors or parameters of the process: speed winding, tensile strength and angle of winding the fiber. Based on the planned matrix are made 8 experiments by changing the three factors on two levels ( $2^3$ ). Received 8 different samples - composite pipe and all will determine the strength of compression. Based on the results will determine the appropriate regression equation that best describes the impact of selected factors on the strength of compression and the resistance of pipes to their complete destruction.

From the extracted results and the regression equation will draw the conclusion that the impact speed of winding strength and tensile fiber is minimal on the resistance of composite pipes and almost no interaction between these factors. The angle of winding will show that has a great impact resistance of composite pipes of compression. The angle of winding fiber act inversely of the potential of compression. The smaller angle of winding means transfer of cargo and adjacent fibers can lead to delamination but not to the destruction of the tubular sample. The results will be of great importance for the application of composite pipes obtained by the method of winding the filaments, especially when the material is required to have a low specific weight and high volume compression.

**Keywords:** design of experiments, winding filaments, composite tubes, strength of compression.

## СОДРЖИНА

		Стр.
1.	ВОВЕД	10
2.	ТЕОРЕТСКИ ДЕЛ	17
2.1.	Што се композити? природата на композитните материјали	17
2.2.	Историја на композитите	18
2.3.	Класификација на композитите	19
2.4.	Техники за порозводство на композити	19
2.4.1.	Лиенење со трансфер на смола	20
2.4.2.	Пултрузија	20
2.4.3.	Намотување на филаменти	21
2.4.4.	Развој на технологијата на намотување на филаменти	22
2.4.5.	Индустриска важност на процесот на намотување на филаменти	24
2.4.6.	Технологија на процесот на намотување на филаменти	24
2.5.	Видови материјали за изработка на композити со метод на намотување на филаменти	26
2.6.	Стаклени влакна кои се користат како зајакнувачи на композити	30
2.7.	Епоксидни смоли кои се користат како матрица во композити	33
2.8.	Методи на намотување	35
2.9.	Најновите достигнувања во технологијата за намотување на филаменти	39
2.10.	Дизајн и анализа на експеримент. Трифакторен план на експеримент	42
2.10.1.	Трифакторен план за експерименти	44
3.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН ДЕЛ	51
3.1.	Користени материјали	51
3.2.	Производство на композитни цевки	54
3.3.	Планирање и дизајн на експеримент	56
3.4.	Определување на јачина на компресија	58
3.5.	Определување на сканинг електронска снимка (SEM) на композитите	61



4.	РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА	63
4.1.	Определување на регресиона равенка т.е равенка за модел од прв ред со три фактори	64
4.2.	Сканинг електронска микроскопија (СЕМ) на тестираните композитни цевки	79
5.	ЗАКЛУЧОК	80
6.	КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА	82
	Листа на табели	85
	Листа на слики	86

## 1. ВОВЕД (INTRODUCTION)

Полимерите и полимерните деривати се материјали што го одбележаа минатиот век, со тенденција да ја задржат и да ја прошират својата улога и во иднина. Нивната широка примена се должи на исклучително добрите својства кои им даваат предност во однос на другите материјали. Со пронаоѓањето и развојот на полимерните композитни материјали се започна нова ера во науката и индустријата, што овозможи да им се прошират хоризонтите на дизајнерите во сите гранки на инженерството.

Полимерните композити се материјали со високи перформанси направени од полимери зајакнати со влакна -Fiber reinforced polymers(FRPs). Системот на полимерниот композит е составен од два елемента: зајакнувач (reinforcement) и полимерна матрица (matrix). Конституентите не се раствораат или комплетно спојуваат само се поврзуваат. Во таква форма зајакнувачите и матрицата ги задржуваат нивните физички и хемиски идентитети и даваат комбинација на својства кои неможат да се постигнат ако делуваат одвоено. Комбинирањето на два или повеќе материјали се прави за да се добие композит со својства какви што неможат да се најдат во конвенционалните материјали. Композитите се добра алтернатива за издржување на висок притисок, отпорност на хемикалии, корозија и високи температури особено во индустриски услови. Индустријата ја препозна способноста на композитните материјали да дадат висококвалитетни, трајни и рентабилни продукти. Со својата примена направија револуција во целата индустрија вклучувајќи ја авионаската, поморската и индустријата за електрична енергија. [1]

Во зависност од типот, намената и својствата кои треба да ги поседува полимерниот композит постојат повеќе методи и процеси за производство. Еден од најчесто користените процеси за производство на композити е „Процес на намотување на филаменти“ (*Filament-winding process*). Во основа овој процес е прецизно и брзо намотување на континуирано влакно натопено во смола по претходно детерминирана шема, потоа се стврдува т.е суши на собна

температура или во печки за да се добие финалниот продукт. *Процесот на намотување на филаменти* дава можност дизајнерот да ги подесува механичките карактеристики, да ги оптимизира јачината, цврстината и термичката стабилност на композитот. Опремата која се користи може да биде во различни големини и конфигурации кои се утврдуваат во зависност од потребата и капацитетот. Машините се компјутерски контролирани и автоматизирани за положување на точен број на слоеви од зајакнувачот. Намотувачите на филаменти даваат можност за производство на било каква форма и да посакаме. Но, традиционално овој процес се користи за производството на цилиндрични и сферични форми т.е. се користи за производство на резервоари и цистерни за хемикалии и гориво, како и за производство на цевки. Материјалите кои се користат за овој процес се континуирани стаклени, јаглородни или кевлар влакна покриени т.е. натопени со термосет смола [1,2].

Постојат бројни параметри кои се предмет на анализа во *процесот на намотување на филаменти* бидејќи Полимерите и полимерните деривати се материјалите што го одбележаа минатиот век и се со тенденција да ја задржат и да ја прошират својата улога и во иднина. Нивната широка примена се должи на исклучително ценетите својства кои им даваат предност во однос на другите материјали. Со пронаоѓањето и развојот на полимерните композитни материјали се започна нова ера во науката и индустријата, што овозможи да им се прошират хоризонтите на дизајнерите во сите гранки на инженерството.

Полимерните композити се материјали со високи перформанси направени од полимери зајакнати со влакна -Fiber reinforced polymers(FRPs). Системот на полимерниот композит е составен од два елемента: зајакнувач (reinforcement) и полимерна матрица (matrix). Конституентите не се раствораат или комплетно спојуваат само се поврзуваат. Во таква форма зајакнувачите и матрицата ги задржуваат нивните физички и хемиски идентитети и даваат комбинација на својства кои неможат да се постигнат ако делуваат одвоено. Комбинирањето на два или повеќе материјали се прави за да се добие композит со својства какви што неможат да се најдат во конвенционалните материјали. Композитите се добра алтернатива за издржување на висок притисок, отпорност на хемикалии, корозија

и високи температури особено во индустриски услови. Индистријата ја препозна способноста на композитните материјали да дадат висококвалитетни, трајни и рентабилни продукти. Со својата примена направија револуција во целата индустрија вклучувајќи ја авионаската, поморската, електричната и транспортната индустрија.

Денес на инженерите им се на располагање повеќе од 160 000 видови материјали, повеќе од 45 000 синтетички полимери, илјадници лесни легури и голем број композитни материјали. Во последните 100 години е забрзан развојот на материјалите. Развој на материјалите значи и развој на соодветна технологија. Постојат илјадници материјали, но понекогаш е проблем да се одбере соодветниот. Секогаш треба да се земат предвид одредени критериуми по кои ќе се врши крајниот избор. Прво: потребно е да се дефинираат условите при кои ќе биде употребен материјалот, бидејќи тоа е во директна врска со својствата на материјалот. Второ: потребно е да се земе предвид можноста за промена на својствата на материјалот за време на неговото користење (на пр: во корозивна средина или висока температура). Последен и многу важен критериум е цената за производство на истиот [3].

Денес голем дел од својствата на материјалите се познати и документирани во прирачници (на пр. ASM Materials Handbook) и сочувани во дигитална форма. Основен дел од обуката на денешниот инженер е компјутерскиот дизајн. Во него ги има на располагање широко достапните пакети за моделирање, оптимизација и селекција на материјалите и на процесите. При изборот на материјалот и процесот софтверскиот пакет се потпира на база на податоци за карактеристиките на материјалите и процесите како и нивната меѓусебна компатибилност. Така што овозможува пребарување и селекција на оние материјали и процеси кои најдобро ги исполнуваат барањата за соодветен дизајн [4].

Оптимално планирање, подготовка и спроведување на експерименти се постигнува со користење на математички методи за обработка на резултатите од тестовите. Користањето на овие методи значително ја олеснува работата на истражувачите, бидејќи се изведува по логично дефинирана редоследна постапка [1, 2].

Во современата математичка теорија за оптимално планирање на експериментите постојат два основни оддели:

- a. Планирање на експериментите заради изучување на механизмите на сложените процеси и својствата на повеќе-компонентните системи.
- b. Планирање на експериментите заради оптимизација на технолошките процеси и својствата на повеќе-компонентните системи [5, 6,7].

Секогаш кога треба да се изврши некаков експеримент истиот треба добро да се осмисли. Императив при тоа е да се извршат само оние проби чии резултати ќе ни дадат најдобри информации и увид во онаа што сакаме да го дознаеме. Методите и начините на изведување на експериментите треба да ни овозможат добивање на максимален број на информации при минимален број на проби. Планот на експериментот е тесно поврзан со проучувањето на процесот или системот за кој го изведуваме експериментот т.е. со стекнување сознанија за нив [8].

Во зависност од типот, намената и својствата кои треба да ги поседува полимерниот композит постојат повеќе методи и процеси за производство. Еден од најчесто користените процеси за производство на композити е „Процес на намотување на филаменти“ (*Filament-winding process*). Во основа овој процес е прецизно и брзо намотување на континуирано влакно натопено во смола по претходно детерминирана шема, потоа се стврдува т.е суши на собна температура или во печки за да се добие финалниот продукт. *Процесот на намотување на филаменти* дава можност дизајнерот да ги подесува механичките карактеристики, да ги оптимизира јачината, цврстината и термичката стабилност на композитот. Опремата која се користи може да биде во различни големини и конфигурации кои се утврдуваат во зависност од потребата и капацитетот. Машините се компјутерски контролирани и автоматизирани за положување на точен број на слоеви од зајакнувачот. Намотувачите на филаменти даваат можност за производство на било каква форма и да посакаме. Но, традиционално овој процес се користи за производството на цилиндрични и сферични форми т.е. се користи за производство на резервоари и цистерни за хемикалии и гориво, како и за производство на цевки. Материјалите кои се користат за овој процес се континуирани стаклени, јаглородни или кевлар влакна

покриени т.е. натопени со термосет смола[9].

Бидејќи механичките својства на комозитите зависат од нив и од составот на нивните конституенти, постојат бројни параметри кои се предмет на анализа во процесот на намотување на филаменти. Основните параметри кои се регулираат се: бројот на намотани нишки, агол на намотување, брзина на намотување, брзина на ротација на цилиндарот, трансверзалната брзина на снопот, напонот на нишките, вискозитетот на смолата и време на кревање на нишките од смолата [10].

Индустријата важност на *процесот на намотување на филаменти* е голема. Продуктите добиени со овој процес се комерцијални во онаа намена каде соодносот јачина - тежина е од голема важност. Наспроти оваа предност, процесот за производство чини малку, а производите покажуваат и својство на електрична отпорност.

Цевките добиени со *процес на намотување на филаменти* се добра замена за корозивните челични и метални цевки за масло, гас и вода. Освен тоа цевките добиени со овој процес се трајни и издржливи дури и нависоки притисоци. По примерот на многу светски земји комерцијализацијата на оваа технологија за производство на цевки може да донесе и голем економски бенефит во нашата земја.

Развојот на напредната технологија за производство на композитни материјали води кон поголема искористеност на комозитите како на домашниот така и на странскиот пазар.

Поаѓајќи од овие теоретски сознанија за *процесот на намотување на филаменти* произлезе мотивот и определбата за темата на магистерската работа. Предметот на ова истражување ќе има научна и практична цел. Користејќи ги сознанијата од еминентни светски и наши автори, понатаму спроведувајќи ги во практичниот т.е. експерименталниот дел во реални производствени услови несомнено овој труд ќе даде значаен придонес за збогатување на научните и стручните компетенции на нашата институција.

Добивањето на полимерни 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, определување на оптимална затегнатост на влакната, определување на соодветен дизајн на композитната цевка што опфаќа различен агол на намотување на влакната, брзина на намотување и сл. Од совладувањето на овие предуслови ќе зависат и својствата на добиениот производ. Оценка за употребната вредност на композитните цевки ќе биде направена преку споредбена анализа на својствата на композитните цевки врз база на различни полимерни матрици и разни типови на влакна[9-11]..

Магистерска тема ќе опфати истражувања поврзани со сите наведени аспекти. Ќе биде направена детална физичко-механичка и термичка анализа на добиените композитни цевки, што претставува актуелен научен интерес во подрачјето на композитните материјали.

## ЦЕЛ НА МАГИСТЕРСКАТА РАБОТА

Во овој магистерски труд ќе се направи планирање на експеримент за процесот на намотување на филаменти (filament winding technology) кој се користи за производство на композитни цевки. Со цел добивање максимален број на податоци со минимален број на експерименти за технолошкиот процес и добивање на соодветни својства на крајниот производ.

За да се постигне целта, ќе се направи анализа на почетните материјали, ќе се утврдат параметрите кои најмногу влијаат на експериментите и истите ќе се користат за планирањето на експериментот. Ќе се користи три факторен метод за планирање на експерименти со две нивоа на варијација  $2^3$ .

Традиционално овој процес се користи за производството на цилиндрични и сферични форми т.е. се користи за производство на резервоари и цистерни за хемикалии и гориво, како и за производство на цевки. Експерименталниот дел од оваа магистерска работа т.е. производството на композитните цевки беше направено во Институтот за современи композити и роботика во Прилеп.

Композитните цевки беа произведени врз основа на стаклени влакна и епоксидна смола при што како параметри на варијација беа земени: брзината на намотување, силата на затегнување на влакната и аголот на намотување на влакната. Произведените композитни примероци, механички се тестирани т.е беше тестирана само јачината на компресија и беа анализирани експериментално добиените резултати споредбени со теоретскиот пристап преку дизајнирањето на процесот.

Индустриската важност на процесот на намотување на влакна е голема. Цевките добиени со процес на намотување на влакнасе добра замена за корозивните челични и метални цевки за масло, гас и вода. Освен тоа, цевките добиени со овој процес се трајни и издржливи дури и на високи притисоци.



## 2. ТЕОРЕТСКИ ДЕЛ (THEORETICAL PART)

### 2.1. ШТО СЕ КОМПОЗИТИ? ПРИРОДАТА НА КОМПОЗИТНИТЕ МАТЕРИЈАЛИ(WHAT ARE COMPOSITES? THE NATURE OF COMPOSITE MATERIALS)

Полимерните композити се материјали со високи перформанси направени од полимери зајакнати со влакна – Fiber reinforced polymers (FRPs). Системот на полимерниот композит е составен од два елемента: зајакнувач (reinforcement) и полимерна матрица (matrix). Конституентите на композитот меѓусебно само се поврзуваат не се раствораат или комплетно спојуваат. Во таква форма зајакнувачите и матрицата ги задржуваат нивните физички и хемиски идентитети и даваат комбинација на својства кои неможат да се постигнат доколку делуваат одвоено. Комбинирањето на два или повеќе материјали се прави за да се добие материјал со својства какви што неможат да се добијат во конвенционалните материјали. Композитите се добра алтернатива за издржување на висок притисок, отпорност на корозија, хемикалии и високи температури особено во индустриски услови. Индустијата ја препозна способноста на композитните материјали кои можат да дадат висококвалитетни, трајни и рентабилни продукти. Со својата примена композитите направија револуција во целата индустрија вклучувајќи ја авионската, поморската, електричната и транспортната индустрија.

Во моментот не постои универзална дефиниција на поимот „*композитен материјал*“. Една од дефинициите може да биде: композит е материјал составен од два или повеќе препознатливи конституенти. Ваква дефиниција може да вклучи речиси се од материјали, камења, минерали, дрво, коски од животни итн. Затоа функционалната дефиниција може да гласи и вака: *композитот е супстанција составена од два или повеќе материјали нерастворливи меѓу себе, кои се комбинирани за да формираат корисен инженерски материјал поседувајќи одредени својства како резултат на заедничкото дејство, но не и од поединечното дејство на секој од конституентите*[1-8].

## 2.2. ИСТОРИЈА НА КОМПОЗИТИТЕ (HISTORY OF THE COMPOSITES)

Концептот на композитните материјали не претставува човечки изум. Дрвото е природен композитен материјал составен од еден вид на полимер (целулозни влакна со добра јачина и цврстина), во матрица од смола на друг полимер(полисахариден лигнин). Природата е полна со примери каде композитите се присутни. Листот на кокосовата палма на пример, е носач на концептот на зајкнување со влакна. Човечкото тело е композит од коски и ткиво, каде коските се зајакнувачи на различните делови на телото. Природата направила добар дизајн на материјали, за кои човекот подоцна успеал да ги препознае предностите но и недостатоците на истите, да го искористи нивниот концепт и создаде материјали со саканите перформанси. Таков пример е дрвото. Двата големи недостатока на природното дрво, неговата големина и анизотропијата на својствата се причината што човекот го модифицирал дрвото и ја создадел иверицата.

Производството на композитите всушност започнува откако е откриена можноста за комбинирање на различни материјали за да се добие материјал со супериорни својства. Тулите од кал зајакнати со слама се направени илјадници години п.н.е. Од раната историја знаеме за *монголските лакови*, направени од тетивите на добитокот, дрво и свила поврзани со адхезиви. Друг пример е *јапонскиот церемонијален меч* и *барелот на дамаскинскиот пиштол* направен од слоеви на железо и челик. Од поновата историја, Втората Светска Војна може да се смета за пресвртница за понатамошниот развој на технологијата за композити. Сепак, раните шеесети се земаат за почеток и издвојување на композитните материјали како посебна дисциплина. Потребата за поиздржлив и цврст материјал а од друга страна лесен и еластичен материјал води кон комбинирање на различни материјали со цел задоволување на потребите на корисникот.

### **2.3. КЛАСИФИКАЦИЈА НА КОМПОЗИТИТЕ (CLASSIFICATION OF THE COMPOSITES)**

Композитите можат да се класифицираат во однос на типот на нивните зајакнувачи:

- Композити зајакнати со честици (со големи честици и дисперзно зајакнати);
- Композити зајакнати со влакна (континуирани-насочени и дисконтинуирани-насочени или случајно ориентирани);
- Структурни композити (ламинати и сендвич структури).

Но, композитите најчесто се класифицираат во однос на типот на нивната матрица:

- Композити со метална матрица (metal matrix composites MMCs);
- Композити со керамичка матрица (ceramic matrix composites CMCs);
- Композити со полимерна матрица (polymer matrix composites PMCs).

При дизајнирањето на композитите потребно е задоволување на двете важни механички карактеристики *крутост и јакост на композитниот материјал*. Иако, во композитите кои се развиени во последните години освен овие две механички карактеристики се бара утврдување на нивната *живавост (отпорност на надворешни влијанија особено отпорност на високите температури)*[3].

Својствата кои ќе ги поседуваат композитите зависат од својствата на конститuentите, нивните удели, геометријата на зајакувачот и адхезијата помеѓу зајакувачот и матрицата.

### **2.4. ТЕХНИКИ ЗА ПРОИЗВОДСТВО НА КОМПОЗИТИ (COMPOSITES MANUFACTURING TECHNIQUES)**

Крајните својства на композитното парче се комбинација од својствата на влакното и матрицата од смола, како и од начинот на кој се произведени. Постојат

различни техники за производство како лиење со трансфер на смола, пултрузија и намотување на филаменти.

Во однос на другите процеси, извлекување на филаменти е најевтин процес и најбрза техника за производство на цилиндрични компоненти и цевки издржливи на висок притисок.

#### **2.4.1. ЛИЕЊЕ СО ТРАНСФЕР НА СМОЛА (RESIN TRANSFER MOULDING)**

Лиење со трансфер на смола е полумеханички процес, кој се изведува под низок притисок, во затворени калапи. Процесот овозможува производство од ниско-перформансни до високо-перформансни артикли во различни големини и форми.

Лиење со трансфер на смола успешно се користи за лиење на парчиња со комплексни тридимензионални форми. Лиењето со трансфер на смола најчесто се користи за лиење на столови, клупи, инки, кади, трупови за бродови итн. При оваа техника за производство на композити се користат дводелни калапи во кои се положуваат неколку слоеви на матови со континуирани влакна, ткаенина или друг вид на материјал врз кои во отворот на калапот под притисок се инјектира течна смола со низок вискозитет која на крај се стврднува.

Потенцијалните предности на техниката за лиење со трансфер на смола можат да се сумираат како: брзо производство на големи, комплексни структури со високи перформанси и мазна површина од двете страни. Флексибилност на дизајнот и можност структурите да се интегрираат во еден единствен функционален дел.

#### **2.4.2. ПУЛТРУЗИЈА (PULTRUSION)**

Пултрузијата е континуиран, автоматски процес. Процесот се покажал ефективен за производство на делови со голем волумен и делови со униформен напречен пресек. Со пултрузијата се овозможува производство на композитни материјали со одлични перформанси, бидејќи смолата е диспергирана, а влакната се ориентирани.

Пултрузијата претставува процес во кој влакна или ровинзи се влечат низ бања во која има смеса од смола, катализатор и други адитиви. Влакната натопени во смолата одат во дел заобликување при што вишокот на смола се отстранува. Потоа поминуваат низ загреан калап, со кој се детерминира геометријата на пресекот и крајниот изглед на продуктот. Со пултрузија можат да се добијат композити со најголема содржина на влакна.

Најчесто со пултрузија се добиваат делови кои се во форма на цврсти прачки, шупливи цевки и различни видови на снопови (намотани под агол, прави и снопови со широки рамки).

Профилите добиени со овој процес по својата јачина и тежина може да се споредуваат со стандардните метални профили направени од челик и алуминиум. Пултритраните делови имаат одлична примена во производството на индустриските мрежи, за производство на степеници, производство на кабли како и во производство на структури склони на корозија.

### **2.4.3. НАМОТУВАЊЕ НА ФИЛАМЕНТИ (FILAMENT WINDING)**

Во процесот на намотување на филаменти група од континуирани ровинзи или монофиламенти импрегрирани во смола се замотуваат на ротирачки мандреал, а потоа се стврднуваат на собна температура или во печка за да се произведе крајниот производ. Оваа техника понуди на индустријата квалитет, вискоа брзина на производство и прецизен метод за полагање на композитните слоеви.

Мандреалот може да биде цилиндричен, кружен или во било која друга форма која нема внатрешна кривина. Меѓу апликациите на намотување на филаменти се наоѓаат цилиндрични и сферни пловни објекти, линиски цевки, боци за кислород или цилиндри за други видови на гасови, делови за ракетни мотори, перки за хеликоптер, големи подземни танкиери за складирање (гас, масло, сол, киселини, бази, вода и сл.).

Процесот не е лимитиран за производство на структури симетрични по оска. Облици во форма на призма и многу комплексни делови (како на пр: спојки, аглести

структури итн.), можат да бидат намотани на опремата на машината и тоа со прецизен број на намотувања и точноодреден степен на слобода.

Модерните машини за намотување на филаменти се нумерички контролирани со висок степен на слобода за положување на точно одреден број на слоеви на зајакнувачи. Механичката цврстина на деловите произведени со намотување на филаментни не зависи само од составот на компонентите туку и од параметрите на процесот како што се: агол на намотување, затегнување на влакното, состав на смолата и циклусот на стврдување[7,8].

#### **2.4.4. РАЗВОЈ НА ТЕХНОЛОГИЈАТА НА НАМОТУВАЊЕ НА ФИЛАМЕНТИ (EVOLUTION OF FILAMENT WINDING TECHNOLOGY)**

Во 1964 година, авторите Росато Д.В и Гров Ц.С во нивната книга со наслов : „Намотување на филаменти, развој, производство, апликација и дизајн“ ја дефинираа технологијата на намотување на филаменти како техника која произведува продукти со голема јачина и мала маса. Композитот добиен со оваа техника се состои од две компоненти: зајакнувач (филамент или некој тип на лента) и матрица од смола.

Уникатните карактеристики на овие материјали направија голема револуција пред многу години. Концептот на процесот на намотување на филаменти бил претставен во раните четириести години кога е направен и првиот обид да се развие опремата за намотување на филаменти.

Опремата која била дизајнирана во 1950 год., била многу едноставна, вршела основни задачи и користела само две оски за движење (ротирачка и оска со хоризонтален пренос), имала неколку држачи и преносни ваљаци за подршка.

Едноставниот дизајн бил доволен со оваа техника да се создадат првите делови за ракетната моторна индустрија. Почетните унапредувања на дизајнот се во делот на користење на механички системи кои може да ги програмира оператор со користење на брзини, ремени, макари и синџири. Овие машини биле ограничени во можностите и капацитетот, но биле точни.

Конечно преку техничките иновации, инженерите биле во можност да дизајнираат серво-контролирана, фото-оптичка машина со хидраулични системи. Посакуваниот пат на движење на влакното се конвертира во машинско движење преку црно-бел интерфејс на барабан, кој го следи фото-оптичкиот уред што ја контролира функцијата на машината.

Во текот на овој период машината за намотување на филаменти станла се повеќе софистицирана во дизајнот. Додавањето на третата оска за движење (радијално или унакрст), шини и топчести осовини во комбинација со подобрени менувачи дале резултат во помазното и попрецизното намотување на филаментите.

Во средината на седумдестите во дизајнот на машината е направена голема промена. Овој пат унапредувањето на серво-технологијата влезе во доменот на дизајнот на машината.

Комјутерите со голема брзина овозможиле процесирање на податоци, резултирајќи сопотивко работење и положување на влакната со поголема точност. Функцијата што била во минатото контролирана со каиши, макари, запченици и синцири на крај била контролирана со користење на комјутерите.

Осмдесетите и деведесетите години се во знак на пораст на употребата на комјутерската технологија. Комјутерите и картиците за контрола на движењето, станале основни делови во хардверот кој е вклучен речиси во секоја машина. Контролата на брзината на машината била многу унапредена. Комјутерските системи за контрола можеле да ја следат позицијата и брзината со голема точност. Дополнителни оски на движење исто така биле додадени во дизајнот на машината, овозможувајќи четири, пет дури и шест оски на контролирано движење. Во исто време бројни компании почнале да експериментираат со поимот и развојот на модел на софтвер (FiberGrafix™ и CADWIND™). Со креирањето на моделот на софтверот, покомплексни конфигурации можеле успешно да се намотуваат на пример: заострени осовини, T- форми и несиметрични делови[12].

#### **2.4.5. ИНДУСТРИСКАТА ВАЖНОСТ НА ПРОЦЕСОТ НА НАМОТУВАЊЕ НА ФИЛАМЕНТИ (INDUSTRIAL IMPORTANCE OF FILAMENT WINDING PROCESS)**

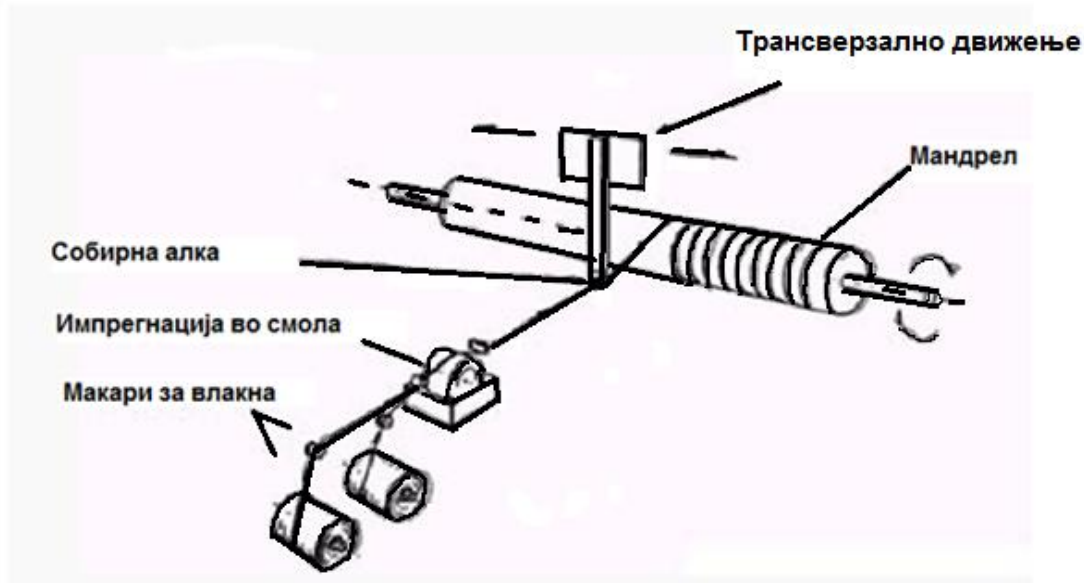
Процесот на намотување на филаменти овозможи производство на издржливи делови со мала тежина, што се покажало корисно особено во производството на делови за авио индустријата, поморската и воената индустрија како и во производството на делови за комерцијална и индустриска примена.

Зајакнувачот и матрицата можат да се прилагодуваат за да се задоволи речиси секое побарување. Ова помогнало во проширување на примената на процесот на намотување на филаменти во речиси секој комерцијален предмет каде соодносот помеѓу јачината и тежината е од голема важност. Освен овие предности, процесот има и мала потрошувачката за производство. Композитите добиени со намотување на филаменти имаат и добри корозивни и електрични својства.

#### **2.4.6. ТЕХНОЛОГИЈА НА ПРОЦЕСОТ НА НАМОТУВАЊЕ НА ФИЛАМЕНТИ (FILAMENT WINDING PROCESS TECHNOLOGY)**

Процесот се одвива така што голем број на ровинзи се спровнуваат низ серија на решетки во бања полна со течна смола, катализатор и други додатоци (како на пример UV успорувачи). Затегнатоста на влакната се контролира со водилки или режи лоцирани помеѓу секоја решетка и бањата со смола. Пред влезот во бањата со смола, ровинзите најчесто се спојуваат во сноп кој се спровира низ текстилна табла со чешел т.е нерфосувачки челичен гребен (Сл.2.1).





Слика 2.1. Шематска презентација на процес на намотување на филамент

Figure 2.1. Schematic representation of filament winding process

На крајот од резервоарот со смола, импрегнираните ровинзи со смола се повлекуваат низ уред за бришење кој го отстрануваат вишокот на смола од ровинзите и ја контролираат дебелината на слојот околу секој ровинг.

Најчесто користен уред за бришење е сет од ролери за притискање во кои позицијата на најгорниот ролер се подесува за контрола на количеството на смола како и затегнатоста на ровингот. Друга техника за бришење на импрегрираната смола е со повлекување на секој ровинг посебно низ отвор. Овој метод за бришење на вишокот на импрегрирана смола резултира со подобра контрола на содржинта на смола на ровингот. Кога ровинзите темелно ќе се импрегнираат и избришат, се спојуваат во рамен сноп и преку собирната алка т.н. око се позиционираат на мандрелот.

Собирната формација се добива кога ќе помине низ нерѓосувачкиот чешел, а подоцна и низ собирната алка. Трансверзалната брзина на движење и брзината на намотување на мандрелот се контролираат за да се добие посакуваната шема и посакуваниот агол на намотување.

По намотувањето, намотаниот мандрел се подlegнува на стврднување и постстврднувачки операции во текот на кој мандрелот се ротира континуирано за

да се одржува униформноста на содржината на смола околу периметарот. По стврднувањето, продуктот се вади од мандрелот со хидрауличен или механички екстрактор[12,13].

## **2.5.ВИДОВИ МАТЕРИЈАЛИ ЗА ИЗРАБОТКАНА КОМПОЗИТИ СО МЕТОД НА НАМОТУВАЊЕ НА ФИЛАМЕНТИ (TYPE OF MATERIALS FOR FABRICATION OF FILAMENT WINDING COMPOSITES)**

Процесот на намотување на филаменти бара континуирано влакно за зајакнување и систем на смола за врзување на влакната меѓусебе. Постојат многу материјали што можат да се користат во овој процес. Важна улога во изборот на материјалот за одреден продукт имаат: економскиот момент, отпорност кон надворешните влијанија, отпорностна корозија, лимитот на тежината како и јачинските перформанси.

**Видовизајакнувачи:** Континуираните влакна го даваат бараниот структурен перформанс на конечното парче. Влакното го дава основниот придонес за јачината и крутоста на композитот што треба да ги поседува. Подоминантни комерцијални влакна се: Е–стаклени, С–стаклени, арамидни и карбонско/графитните системи.

Е-стаклените влакна се со 3/4 добра јачина на истегнување (3450 МПа), ниски модули на истегнување (70GPa). Овие се најевтини влакна и се достапни во различни форми. Е-стаклените влакна имаат широка комерцијална и индустриска примена. Најчесто се користат во процесот со намотување на филаменти. Од вкупното производство на стаклени влакна 93% отпаѓаат на Е-стаклените влакна. Своето име го добило по добрите електрично изолациони својства, ако се додадат и добрите механички карактеристики, очигледно е зошто е толку големо производството на ова влакно.

С-стаклени влакна се со 3/4 добра јачина (4600МПа) и имаат повисоки модули на истегнување (85GPa) т.е. имаат најдобри механички својства. Овие влакна се скапи, затоа нивната употреба е ограничена и се користат во авијацијата и високо-перформансни апликации за во поморската индустрија.

Арамидни влакна се со 3/4 добра јачина (2750 МПа) и имаат повисоки модули на истегнување (130 GPa). Арамидните влакна имаат повисока цена на чинење и многу ниска густина (пола од стакленото влакно). Даваат одличен ефект, поседуваат толеранција на распаѓање, имаат мала компресија и јачина на смолкнување.

Карбонско/графитните влакна се со 3/4 голем распон на јачина (2050 до 5500 МПа) имаат повисоки модули (210-830 GPa), висока цена на чинење и средна густина (2/3 од стаклените влакна). Овие влакна имаат мал ефект и толеранција на распаѓање, поседуваат добра јачина на истегнување и крутост.

### **Смоли:**

Смолата е матрицата која соединува се во композитот и обезбедува механизам на трансфер на оптоварување помеѓу влакната кои се намотани околу конструкцијата.

Покрај тоа што служи да ги врзува композитните структури заедно, матрицата од смола обезбедува отпорност на корозија, ги штити влакната од надворешно оштетување и придонесува за сеопштата отпорност на композитот на надворешните влијанија, кинење, абразија и груба употреба (табела 1).

Системите на смола доаѓаат од различни хемиски фамилии, секоја дизајнирана да даде одреден структурен перформанс, цена на чинење и отпорност на надворешни влијанија. Постојат неколку големи фамилии на матрици кои се од интерес за процесот на намотување на филаменти:

Општо наменски полиестер: се класифицира како ортофтален полиестер, со ниска цена на чинење. Широко се користи во индустријата за полимери зајакнати со влакна, умерено е цврст, отпоен на корозија и полимеризира на собна температура.

Подобрен полиестер: се класифицира како изофтален полиестер, со малку повисока цена на чинење, добра јачина и добри корозивни својства. Има широка примена во индустријата за полимери зајакнати со влакна, отпорен е на корозија и полимеризира на собна температура.

Епоксидни смоли: имаат широк спектар од достапни смоли. Показуваат најдобри јачински својства и полимеризираат на покачена температура. Отпорни сена хемикалии и поседуваат висок вискозен систем. Епоксидните смоли имаат повисока цена на чинење и широка примена.

Винилни естри: тоа се комбинација од епоксид и полиестер, имаат одлични корозивни својства, висока цена на чинење, одлична јачина и голема отпорност на надворешни влијанија. Винилните естри имаат голема примена како антикорозивни постелки во индустријата за производство на полимери зајакнати со влакна.

Фенолни смоли: покажуваат одлични својства на отпорност на оган и голема цена на чинење. Имаат мала елонгација, умерена јачина и имаат примена претежно во огноотпорни системи.

#### **Адитиви:**

Со користење на разновидни адитиви течниот систем на смолата може да поседува специфични својства. Филерите го сочинуваат најголемиот процент од системот, а потоа следи смолата.

Најчесто користени филери се калциум карбонат, алуминиум силикат (глина) и алуминиум трихидрат. Калциум карбонат се користи најчесто за зголемување на волуменот. Целта е снижување на цената се разбира таму каде бараните перформанси се задоволени.

Алуминиум трихидрат е адитив кој се користи за сузбивање на оган и загушување на чадот. Филерите можат да бидат застапени и до 50% од вкупната маса на смолата. Вообичено волуменот е лимитиран во однос на вискозитетот кој зависи од големината на честичките и карактеристиките на смолата.

Адитивите за специјална намена вклучуваат и заштита од ултравиолетово зрачење, пигменти за обојување, антимоно оксид за гасење на оган и агенси за измазнување на површината и израмнување на пукнатини. Понатаму постојат и филери за ослободување од калапот (метални стеарати, силика гел или органско фосфатни естри). Овие филери се важни за намалување на триењето, така што

мандрелот може полесно да се ослободи а површината на добиениот продукт ќе остане мазна[7].

Табела 2.1. Производи добиени со методот на намотување на филменти:  
апликација / користен систем на смола

Table 2.1. Filament wound products: applications / resin systems used

Индустрија	Типична апликација	Системи на смола
Корозија	Подземни танкери Надземни танкери	Полиестер (орто- и изо-фтален) Винилен естер
	Системи од цевки Бротка палуба Затворени системи	Полиестер (орто- и изо-фтален) Винилен естер, епоксид и фенолен естер
Нафтена	Системи од цевки Осовини Цевчести структури	Епоксид, фенолен естер
Хартија и целулоза	Хартиени валјаци Системи од цевки Затворени системи	Винилен естер, епоксид
Инфраструктура и цивилно инженерство	Обвивки за столбови Цевчести структури Електрични столбови	Полиестер (орто- и изо-фтален), винилен естер, епоксид
Садови под притисок	Греалки за вода Соларни греалки Танкери Филтер танкери Танкери за природен гас	Епоксид, фенолна смола, винилен естер
Авијација	Ракетени мотори Осовини Туби за лансирање Трупот на авионите Танкери за висок притисок Танкери за бензин	Епоксид
Поморството	Осовини Јарболот и бродната конструкција	Епоксид
Спорт и рекреација	Голф палки Конструкцијата на велосипедите Сурферските табли Реквизити за скијање	

Цевките добиени со методот на намотување на филаменти се добра замена за корозивните челични метални цевководни системи за снабдување на масло, гас и вода. Од суштинско значење е потребата за замена и преработка на цевководите за вода и канализација со композитни цевки, бидејќи се трајни, некорозивни и можноста за нивно оштетување дури и под висок притисок е речиси невозможна.

Технологијата за производство на композити и нивна апликација направи голем прогрес особено во последните две декади, што е евидентно од нивната потрошувачка за околу 2.2 милиони тони на композитен материјал на светско ниво.

Моментлно околу 40 000 композитни продукти се користат во низа апликации во различни сектори во индустријата низ светот. Кина и Индија бележат големо производство на композити и зачудувачка потрошувачка на истите. На годишно ниво Кина троши 200 000 тони во споредба со Индија која троши 30 000 тони. Индија може да се каже дека е лулка на новите технологии за производство на композитни материјали бидејќи има достапни различни видови на суровини, одлична база на знаење за различни видови на смоли, катализатори и системи за полимеризација. По примерот на земјите од светот развојот и комерцијализирањето на технологијата за производство на композити со метод на намотување на филаменти и нивна апликација во многу сегменти на индустријата и животот може да донесе пораст во економијата и во нашата земја.

## **2.6. СТАКЛЕНИТЕ ВЛАКНА КОИ СЕ КОРИСТАТ КАКО ЗАЈАКНУВАЧИ НА КОМПОЗИТИ (GLASS FIBERUSED AS REINFORCEMENT IN THE COMPOSITES)**

На почетокот на производството стаклените влакна биле со алкален состав. Денеска речиси сите се безалкални. Тоа значи дека во нивниот состав не содржат бази (хидроксида, карбонати и хидросулфида). Секој оксид има посебни карактеристики и во зависност од неговата застапеност во вкупниот хемиски состав, таа карактеристика е повеќе или помалку доминантна. На пример  $\text{SiO}_2$  има мала термичка експанзија, додека  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$  имаат висока експанзија и

слаба отпорност на вода, а CaO и MgO се карактеризираат со голема хемиска постојаност, отпорност на вода, киселина и алкалии.

Благодареејќи на своите извонредни механички и хемиски особини стаклените влакна наоѓаат широка примена како армирачки елементи. Особините на стаклените влакна зависат од повеќе фактори но највеќе од нивниот хемиски состав. Цврстината на стаклените влакна е обратно пропорционална од пречникот на влакната. Затоа е од голем интерес да се произведат стаклени влакна со што помел пречник.

Влажноста е еден од важните фактори кој ја намалува цврстината на стаклените влакна. При тоа, се мисли на влажноста на работните простории во кои се произведува, како и на влажноста на просториите во кој се чуват и експлоатираат. Докажано е дека цврстината на стаклените влакна е најголема непосредно по извлекувањето, која потоа опаѓа за 20% кога во просторијата влажноста ќе се покачи. Затоа се препотачува при современото користење на влакната да се намотуваат поможност по извлекувањето.

При извлекувањето на влакната доаѓа до формирање на внатрешни и надворешни дефекти, во форма на пори или пукнатини. Дефектите можат многу да влијаат на својствата на влакната, особено на нивната цврстина т.е издржливост големо влијание имаат површинските дефекти. Површински активните материји (пример влагата), под дејство на адсорбирачките сили влегува во пукнатините и доаѓа до нивно проширување и раст на пукнатините а, со тоа се смалува цврстината на самото влакно.

Разгледувајќи ги својствата на стаклените влакна, мора да се истакне нивната физичка карактеристика соодносот на нивната цврстина со оптоварувањето. Стаклените влакна покажуваат голема еластичност, кои до својот тотален прекин или распад се придржуваат на Хуковиот закон.

Стаклените влакна кои се користат во композитите подлегнуваат на површински третман *апретур*, при кој се врши нанесување на врзивно средство. Со оваа завршна површинска обработка се зголемува адхезијата помеѓу стаклените влакна и смолата, заштита од механичка повреда, отпорност при транспорт и сл. Апретот се состои од повеќе функционални компоненти: врзиво, средство за

подмачкување и средство за формирање на филм, кои имаат точно одредена функција. Пример, врзивото обезбедува атхезија меѓу смолата и стаклените влакна, средството за формирање на филм обезбедува слепување на влакната и заштита од механичка повреда, а средството за подмачкување ги штити од меѓусебното триење при нивното користење.

Во зависност од типот на смолата се одбира и апретот. За епоксидна смола се користи А1 100, РТ 12, РТ 13, ТФ 935, Волана -114 и др. Правилниот избор на апрет може многу да влијае на особините на композитот.

Под дејство на светлината настанува структурно пореметување на композитите со епоксидна матрица, ги раскинува хемиските врски и предизвикува фотооксидна реакција. Светлината може да биде расеана по површината на композитот или да се апсорбира во внатрешноста на композитот. Да се намали разорното дејство сончевата светлина се воведуваат светлосни стабилизатори кои се додаваат во концентрација од 0,05% до 2%. Најефективни се оние светло-стабилизатори кои можат да ја апсорбираат светлината која паѓа на композитот и да ја претворат во нештетна за матрицата. Најчесто користени светлостабилизатори се: естерска салицилна киселина, бензоксазол, бензимидазол, диоксибензофенон и др. Главен недостаток е тоа што за нивната заштитна функција потребно е композитот да поседува одредена дебелина, што ги прави неефикасни во користењето на тенкосидни елементи.

Епоксидната матрица под дејство на атмосферскиот кислород подлегува на оксидација. Оксидацијата ги намалува физичко-механичките карактеристики на композитот, со што се смалува времето на нивната експлоатација. Под дејство на оксидацијата површинскиот слој на композитот станува жолт, се јавуваат нерамнини и се намалува просирноста.

За да се намали запаливоста на композитите со матрица од смола, се користат хемиски продукти антипирени. Загревањето зависи од термофизичките својства на епоксидната смола, а деструкцијата од количината на лабилните врски и останатите додатоци. Испарливите материи кои се ослободуваат во термичката деструкција доведуваат до создавање на порозни структури. Создадените пори овозможуваат подобар контакт со атмосферскиот кислород, кој од друга страна го



активира оксидационите процеси. Добиениот тврд остаток најчесто е карбонизиран продукт, кој со акумулиранта топлина ја зголемува пиролизата (запаливоста) на врзивата. Како резултат на тоа доаѓа до покачување на температурата, интензивно ослободување на испарливи материи и горење. Во зависност од типот на епоксидната смола се користа разни видови на антипирени. Поради органската природа на полимерната матрица и со употребата на антипирени неможе да се постигне целосна незапаливост на композитот

Изразените диелектрични особини на епоксидните смоли, предизвикуваат голем статички електрицитет. Антистатичите се такви додатоци во синтетичките смоли, кои го смалуваат степенот на електроизолација. Сите споменати стабилизатори имаат индивидуално дејство, но денес се повеќе се користат стабилизатори со комплексно дејство со широк спектар на стабилизаторско дејство.

## **2.7. ЕПОКСИДНИ СМОЛИ КАКО МАТРИЦА ВО КОМПОЗИТИТЕ (EPOXY RESINS AS MATRIX IN THE COMPOSITES)**

Епоксидните смоли претставуваат соединенија кои во својата молекула ја содржат епоксидната група ( $R_1R_2C-O-CR_3R_4$ ). Епоксидните смоли може да имаат најмалку две епоксидни групи и се нарекуваат диепоксидни смоли или полиепоксидни смоли оние кои содржат повеќе епоксидни групи. Полимеризацијата на епоксидната смола се врши преку епоксидните и хидроксилните групи. Соединенијата кои содржат активни водородни атоми (феноли, алкохоли, амини), можат да го разбијат епоксидниот прстен (формиран од епоксидните групи кои ги соединуваат јаглеродните со кислородните атоми).

Епоксидните смоли може да стврдуваат на собна температура и тогаш настанува така нареченото ладно стврдување. Но стврдувањето може да се одвива и на покачена температура и тогаш се нарекува топло стврдување.

Количината на стврднувач кој се додава при вмрежувањето на епоксидните смоли е точно пресметано. Пресметката се води така што за секоја епоксидна група да се обезбеди по еден активен водороден атом за да може реакцијата да се одвива оптимално. Нарушувањето на овој однос, може да придонесе до пореметување на процесот на вмрежување, што резултира со послаби својства на стврднатиот полимер. Ако износот на стврднувачот е точно дефиниран, количината на катализаторот се додава со експериментално утврдување. При отстапувања во количината на катализаторот што се додава, не доаѓа до пореметување на својствата на стврднатиот смола.

Епоксидната смола која се користи како врзиво, зазема водечко место во производството на композити поради своите механички и електрични својства. Епоксидната смола поседува: добра хемиска отпорност на бази и киселини, добри електроизолациони својства, лесно стврднување на температура од 5°C до 150°C во зависност од изборот на сретствата за стврднување, мало собирање во текот на стврднувањето и одлична адхезија со полнителите кои се употребуваат во композитите.

Во текот на експлоатацијата, полимерниот материјал е изложен на дејството на надворешната средина. Значи, композитот е изложен на дејството на влажниот воздух, дожд, ветер и разни гасови. Сите овие фактори придонесуваат да композитите изгубат дел од своите особини, со што се намалува нивната корисна вредност. Промената на физичките и хемиските особини на композитите за време на преработката, чувањето и експлоатацијата се нарекува со еден општ поим *старење*. Факторите кои влијаат на старењето можат да се поделат на надворешни и внатрешни. Внатрешните фактори имаат мало влијание на старењето на матрицата тоа се: структурата и составот на матрицата (врзива), молекуларната маса, обликот на внатрешните дефекти (како последица на нерамномерното распоредување на армирачот и внатрешните напрегања). Надворешните фактори се подоминантни, тука спаѓаат: температурата на воздухот и неговата влажност, сончевата светлина, радијацијата (UV зрачење) и дејството на други агресивни состојки во воздухот. За да се зголеми постојаноста на матрицата во однос на сите наведени фактори се врши стабилизација на

матрицата. Дејството на стабилизаторите се сведува на смалување на процесот на деструкција т.е. блокирање на некои понестабилни врски во молекулата и филтрирање на светлосното зрачење. При изборот на стабилизаторот освен ефективност се земаат во обзир и: можноста за мешање со други супстанции, лепливоста, мирисот, токсичноста, врзувањето со други хемиски компоненти итн.

За зголемување на термичката стабилност на матрицата се додаваат термостабилизатори. Термостабилизаторите се многу важни доколку во текот на преработката и доработката на композитот се јавуваат поголеми термички оптоварувања. Како термостабилизатори се користат: оловни соли, органски соединенија, метални соли на органски киселини и др. [16].

## **2.8. МЕТОДИ НА НАМОТУВАЊЕ НА ФИЛАМЕНТИ (FILAMENT WINDING METHODS)**

Подстојат два различни методи на намотување:

- *мокро намотување*: во кој влакната поминуваат низ бања со смола и се намотуваат на ротирачки мандрел и
- *суво намотување*: во кој неимпрегрирани влакна се влечат и директно се позиционираат и се импегнират на површината на ротирачки мандрел.

Помеѓу овие методи, мокрот намотување почесто се користи за производство на композитни цилиндри, со терморепактивна матрица и влакна како зајакнувачи.

Во споредба со сувото намотување каде се добиваат композити со подобри механички својства, влажното намотување има други предности: ниска цена на чинење, кратко време на намотување и можност за варијација на формулацијата на смолата така што би можеле да се постигнат специфични перформанси. Сувото намотување поради повисоките трошоци за импегнирање, се користи за високо перформансни апликации.

Кај влажниот метод на намотување на влакната, квалитетот зависи од повеќе фактори. Вискозноста има големо значење за оваа технологија за производството на композитот. Ако вискозноста е премногу голема, импрегнирањето на влакната е нерамномерно. При ниска вискозност на смолниот систем, смолата може да тече надвор од делот за намотување и да предизвика релативна ниска процентуална тежина на смола во готовиот производ. Затегнатоста на крајот е многу важна е исто така, од неа зависи колку добра импрегнација на истиот ќе имаме.

Секој намотан слој може да се разликува во затегнатоста на намотување, аголот на намотување или содржината на смолата т.е. масениот удел на смола. Со промената на аголот на намотување во однос на оската на мандрелот, може да се добие производ со голема издржливост во однос на силата на оптоварување. Аголот на намотување се бира во однос на примената на производот. Спиралното намотување на слоеви е под агол  $\pm\theta$ , додека радијалното намотување е под агол од  $90^{\circ}$ . Во пракса се користи и комбинација од двата типа на намотување заради поголема механичка отпорност. Други предности на овој метод се висока специфична сила, специфичен модул на влакната, волуменски процент на готовиот производ и висока повторливост на процесот. Производството може да се повторува sukcesивно, за да се постигнат истите својства на готовите производи.

Процесот има свои ограничувања во однос на производството на комплексни форми, поради потребата од сложен дизајн на мандрелот. Производството на делови со конкавни површини е невозможно со овој метод.

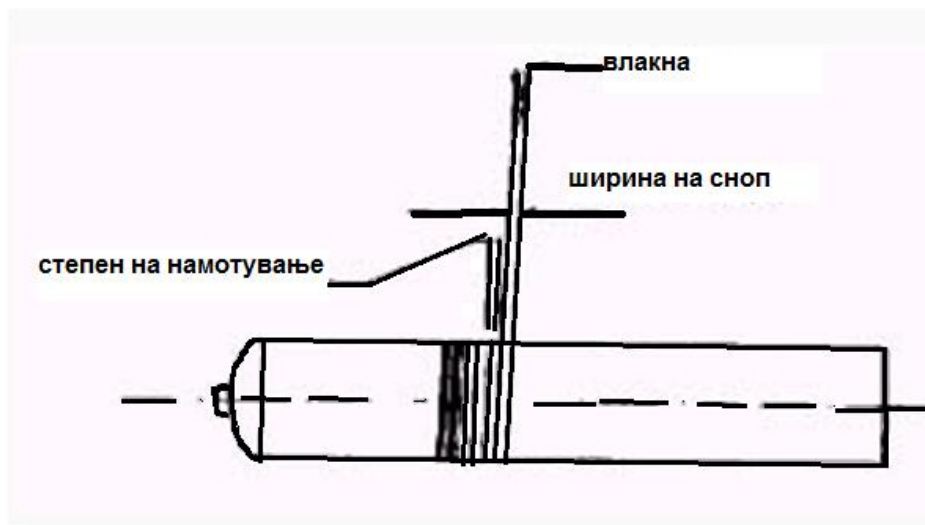
Заради испитување на композитите добиени со метод на намотување на филаменти се користат т.н. тест прстени, заради испитување на аксијален притисок, внатрешен притисок и нивните можни комбинации.

Со дизајн експериментите може да се истражи интеракцијата на производот и променливите кои влијаат на јачината на истегнување и квалитетот на прстенестите примероци. Механичките својства на производот зависат од кршењето на влакната во текот на нивниот транспорт при самиот процес на намотување на влакната. Контролираната затегнатост при намотувањето директно влијае врз силата на истегнување на прстенестиот примерок [17,18].

Токму ова беше целта на оваа магистерска работа, да се анализираат променливите параметри на технологијата на намотување на филаменти, како и конечните својства на прстенестите примероци, произведени со истата.

Во процесот на намотување на филаменти постојат параметри што треба да се постигнат како на пример: јачина на намотување, агол на намотување, како и содржина на смола на секој слој на намотување до бараната јачина и дебелина на композитот. Својствата на крајниот композитен материјал можат да варираат според избраниот тип на шемата на намотување. Постојат три основни типови на шеми на намотување:

*Кружно намотување*: познато е како дебело намотување или намотување по обем. Во суштина кружното намотување е спирално намотување под висок агол од околу 90 степени. Од страна на секоја целосна ротација на мандрелот, снопот се поставува веднаш пред веќе претходно положениот намотај (сл.2.2.).

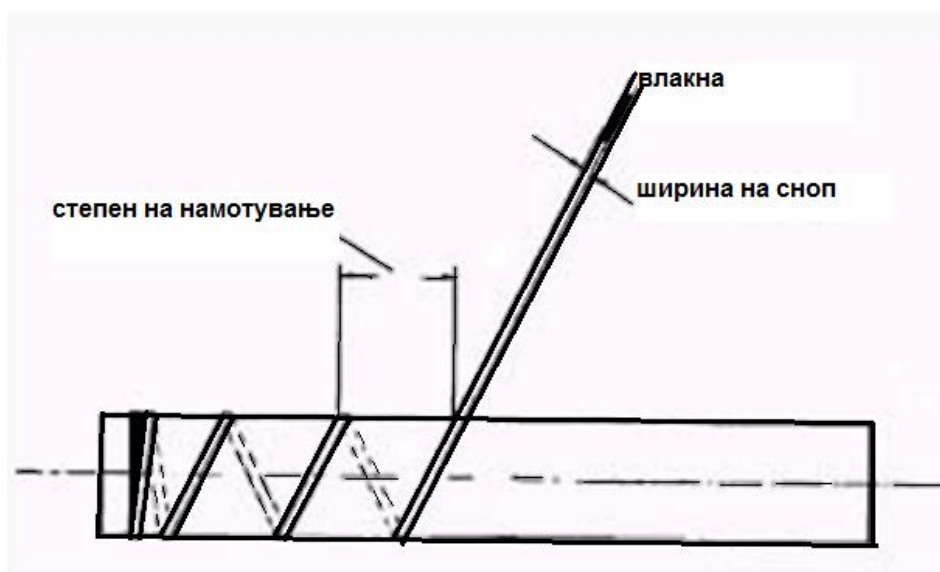


Слика 2.2.Кружно намотување

Figure 2.2.Hoop winding

*Спирално намотување*: во спиралното намотување мандрелот ротира со константна брзина додека носачот на влакната се движи напред и назад со брзина која се регулира за да се генерираат саканите спирални агли како што е прикажано на (сл.2.3.). Кај ова намотување, по неколку движења од едниот кон другиот крај се забележува преплетување на слоевите. За да се добие еден

систем на рамнотежа, количината на влакната намотани во еден правец, мора да биде ист и во другиот правец.



Слика 2.3. Спирално намотување

Figure 2.3 Helical winding

*Поларно намотување:* во поларото намотување влакното минува тангенцијално од поларните отвори до крајот на комората и обратно. Со други зборови влакната се намотуваат од едниот до другиот пол, како што мандрелот ротира лонгитудинално како што е прикажано на слика 2.4. Се користи за аксијално намотување на туби и разни видови на садови што се користат под притисок. На садови со паралелни страни се прави последователно периферно намотување.



Слика 2.4. Поларно намотување  
Figure 2.4 Polar winding

Од наведените начини на намотување, спиралното намотување е најфлексибилно за избор на можности за намотување. Речиси секоја комбинација на шема за намотување е возможна да се намота под агол, независно од должината и дијаметарот на снопот за намотување. Најчесто сите композитни туби и садови за висок притисок се произведуваат со спирално намотување[18,19].

## 2.9. НАЈНОВИ ДОСТИГНУВАЊА ВО ТЕХНОЛОГИЈАТА ЗА НАМОТУВАЊЕ НА ФИЛАМЕНТИ (RECENT ADVANCES IN FILAMENT WINDING TECHNOLOGY)

Денеска повеќето машини за намотување на филаменти се нумерички контролирани, така што се постигнува повисок степен на слобода на положување на влакната на посакуваната позиција. Ваквиот дизајн на машината дава можност да се постигнуваат и комплексни конфигурации на дизајнот на продуктите.

Ориентацијата на влакната е одлучувачки фактор во јачината на композитот. Компанијата „*MATERIALS.A*“ од Брисел, Белгија го развиле софтверот CADWIND за добивање сопствена ориентација на влакната, со цел постигнување подобар

квалитет на продуктите добиени со методот за намотување на филаменти. CADWIND ги калкулира бараните јачински својства, положувањето на мандрелот и автоматски го генерира делот од програмата за намотување. Структурата на продуктот се репродуцира по точната калкулација на CADWIND програмата [20,21].

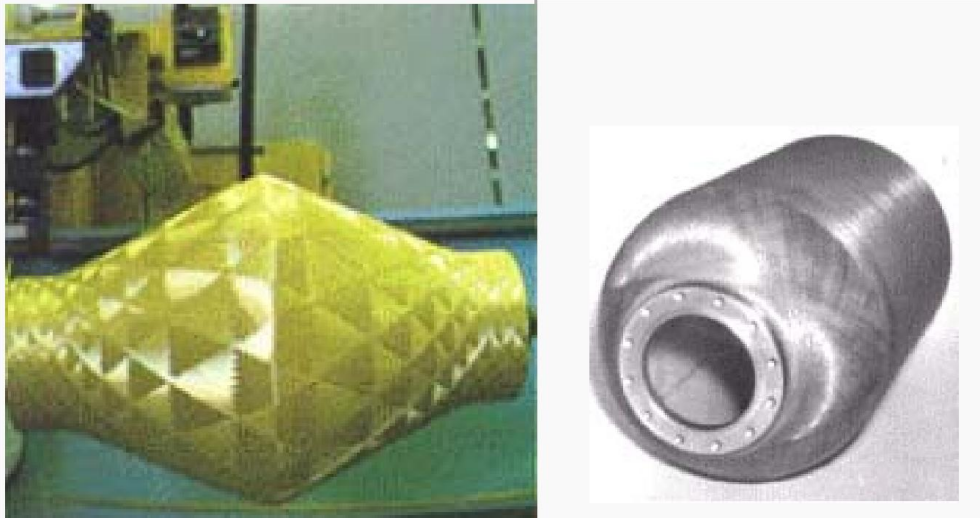
Дизајнираниот софтвер креира 3D модели на мандрелот и интерфејс за влез во моделите на мандрелот преку CAD системите. Калкулира симетрични и несиметрични геометрии по оска на мандрелот и ја чува ламинатната структура како интерфејс на финалниот елемент на програмата. Со оваа програма постои можност за варијација на аголот за намотување. Компјутерите со користењето на CADWIND софтверот можат да контролираат и повеќе оскино намотување на филаментите, како и повеќе ирегуларни форми без оска на симетрија (Сл.2.5) и (Сл.2.6).



Слика 2.5. Машина за намотување на филаменти оптимизирана со CADWIND софтвер

Figure 2.5 Filament winding machine optimize with CADWIND software





Слика 2.6. Варијацији на аголот на намотување  
Figure 2.6 Variations of winding angle

## **2.10. ДИЗАЈН И АНАЛИЗА НА ЕКСПЕРИМЕНТОТ. ТРИФАКТОРЕН ПЛАН НА ЕКСПЕРИМЕНТ (DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENTS. THREE FACTORS PLAN OF EXPERIMENT)**

Експериментирањето е важен дел од научните и инженерските истражувања. Во делот каде научно истражуваниот домен е многу познат за причинско-последичните варијабли освен емпириски модели постои можност да се развијат и математички модели. Целта на добро дизајнираниот експеримент е со помал број на проби или експерименти да се добијат максимален број на резултати или информации за истражуваниот процес или систем.

Процедурата за дизајнирање на експерименти е следнава:

- Претсатва на суштината на проблемот;
- Избор на одзивна варијабла;
- Избор на фактори, нивоа и опсези;
- Избор на експериментален дизајн;
- Изведување на експериментот;
- Статистичка анализа на податоците;
- Заклучок и препорки.

Неопходно е внимателно да се работи во секоја фаза од процедурата и последователно да се прибираат информациите, да се дефинираат целите, за да може да се извлече вистинскиот заклучок од експериментот [19,20,21].

Често пати не е едноставно да се сфати суштината на проблемот. Корисно е да се состави листа со специфични проблеми на кои треба да се обрне внимание во текот на експериментот. Разбирањето на суштината на проблемот, суштествено придонесува за разбирање на феноменот кој се проучува и за неговото решение. При изработката на експериментот за магистерскава работа голема енергија се вложи во дефинирањето на проблемот, причините и последиците за појавата на одредени механички својства на композитните цевки добиени со методот намотување на филаменти.

Изборот на одзивната варијабла дава корисни информации за процесот кој се проучува. Најчесто просечната или стандардната девијација на мерената

карактеристика претставува одзивна варијабла. Во нашиов случај одзивни варијабли се стандарднат девијација на брзината на намотување, јачината на затегнување и типот на влакното кое се користи во експериментот.

Кога целта на експериментот е скрининг на факторите или карактеризација на процесот, најдобро е бројот на нивоата да се држи низок. Исто така треба да се дефинираат опсезитие и нивоата во кои факторите ќе бидат варирани. За да се направи тоа потребно е познавање на процесот како и практично искуство како и теоретско знање за што добивме несебична поддршка од вработените во институтот за современи композити „Микросам“ каде го изведовме и проучувавме нашиот експеримент.

Претставата на суштината на проблемот, изборот на одзивните варијабли и изборот на опсези и нивоа се нарекува пред-експериментално планирање, кое претставува императив за добар дизајн на еден експеримент. Дизајнот на експериментот претставува избор на големина на примерокот, број на реплики и редослед на опитите за експериментирање. Изборот на дизајн, значи и избор на емпириски модел за толкување на резултатите. Најчесто се користи полиномен модел од понизок ред, кој претставува квантитативна поврзаност меѓу одзивот и значајните дизајн фактори. Моделот од прв ред со две варијабли е:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \varepsilon$$

Каде:  $y$  е одзивот,  $X$ -ите се факторите, со  $\beta$  е означен познатиот параметар кој ќе биде одреден од податоците на експериментот и  $\varepsilon$  е експериментална грешка на системот која се проучува. Вообичена екстензија на моделот од прв ред е додавање на интерактивен член:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \varepsilon$$

Каде  $x_1x_2$  ја претставува интеракцијата на два фактори.

При изведувањето на експериментот грешките можат да го направат невалиден. Препорачливо е пред експериментот да се направи пробно

изведување. Најчесто се греша во не поставувањето на варијаблите на соодветното ниво.

Ако експериментот е добро дизајниран нема да има потешкотии во примената на статистичките методи. Статистичките методи се користат за анализа на податоците за резултатите и заклучоците да бидат објективни. Статистичките методи не можат да предвидат дали некој фактор има одреден ефект, тие само претставуваат водич дали за доверливоста и валидноста на резултатите.

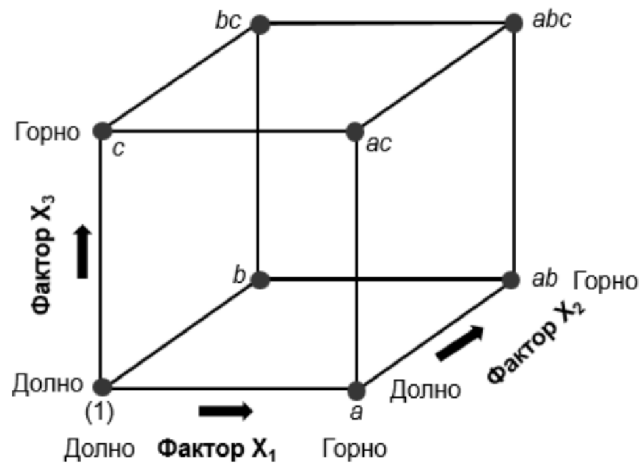
Штом резултатите ќе бидат анализирани треба да се извлечат и практични заклучоци за истите. Најчесто за презентација на други се користат графички методи. Експериментирањето е важен сегмент во процесот на учењето. Поставуваме хипотези, правиме експерименти и врз база на резултатите поставуваме нови хипотези итн.[22-27].

### **2.10.1 ТРИФАКТОРЕН ПЛАН НА ЕКСПЕРИМЕНТ (THREE FACTORS PLAN OF EXPERIMENT)**

Ако претпоставиме дека имаме процес кој зависи од три фактора,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  дека секој фактор има две нивоа. Ваквиот дизајн е наречен  $2^3$  факторен дизајн. Минималниот број на експерименти кои треба да се направат е:

$$N = 2^k = 2^3 = 8$$

За да го имплементираме овој дизајн треба да експериментираме со минимум 8 комбинации на фактори и нивоа. Ако секоја комбинација ја реплицираме два пати, тогаш минималниот број на тестови е 16. Осумте комбинации на тестови може геометриски да ги претставеме во вид на коцка (Сл.2.7)[28].



Слика 2.7. Геометриска претстава на дизајнот на експериментот  
 Figure 2.7 Geometric representation of the design of experiment

Ако ги кодираме горното и долното ниво, осумте тестови можат да се претстават во матрица како во табелата 2.2.

Табела 2.2. Матрица на дизајнот на експерименти од типот  $2^3$   
 Table 2.2 Matrix of type  $2^3$  experiment design

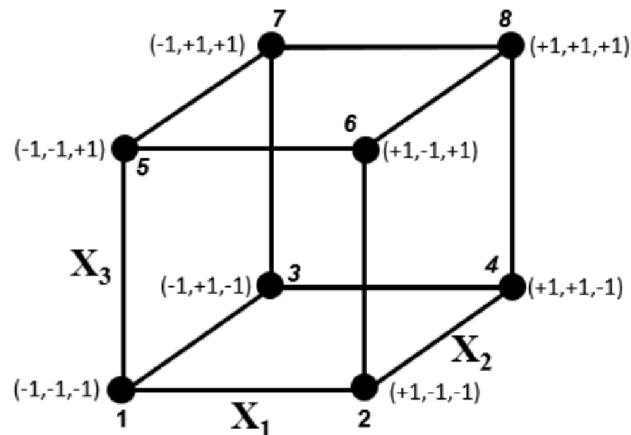
ТЕСТ	ФАКТОР		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

Ако во матрицата се внесе редоследот на тестовите, се добива проширена матрица, од која се гледа која комбинација од факторите одговара на соодветниот тест (Таб.2.3)[28].

Табела 2.3. Проширена матрица на дизајнот на експериментот  
 Table 2.3 Extended matrix of the design of experiment

ЕКСПЕРИМЕНТ	РЕДОСЛЕД НА ЕКСПЕРИМЕНТИТЕ	ФАКТОР		
		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	(1)	-1	-1	-1
2	A	+1	-1	-1
3	B	-1	+1	-1
4	Ab	+1	+1	-1
5	C	-1	-1	+1
6	Ac	+1	-1	+1
7	Bc	-1	+1	+1
8	Abc	+1	+1	+1

Геометриски редоследот на тестовите според дизајнот на експериментот може да се претстави вака (Сл.2.8)[28].



Слика 2.8. Редослед на тестовите според дизајнот на експериментот  
 Figure 2.8 Sequence of tests according to the design of experiment

Ако ја внесеме интеракцијата меѓу факторите, матрицата ќе го добие следниов изгед (Таб.2.4)

Табела 2.4. Матрица на главните ефекти и нивните интеракции  
 Table 2.4 Matrix of main effects and their interactions

ЕКСП.	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Консеквентно се одредуваат главните ефекти.

Главен ефект X<sub>1</sub>

Ефектот на X<sub>1</sub>, кога X<sub>2</sub> и X<sub>3</sub> се на долното ниво, е:

$$\frac{a - (1)}{n}$$

n е бројот на разлики (најчесто n = 2).

Ефектот на X<sub>1</sub> кога X<sub>2</sub> е на горното ниво а X<sub>3</sub> е на долното ниво, е:

$$\frac{ab - b}{n}$$

Ефектот на X<sub>1</sub> кога X<sub>2</sub> е на долното ниво а X<sub>3</sub> е на горното ниво, е:

$$\frac{ac - c}{n}$$

Ефектот на X<sub>1</sub> кога X<sub>2</sub> е на горното ниво и X<sub>3</sub> е на горното ниво, е:

$$\frac{abc - bc}{n}$$

Добиваме дека просечниот ефект на X<sub>1</sub> е просечната вредност од овие четири ефекти:

$$X_1 = \frac{1}{4n} [a - (1) + ab - b + ac - c + abc - bc]$$

Главен ефект на X<sub>2</sub>

Слично како за X<sub>1</sub> така и за X<sub>2</sub> главниот ефект е:

$$X_2 = \bar{Y}_+ X_1 - \bar{Y}_{-X_2} = \frac{1}{4n} [b+ab+bc+abc-(1)-a-c-ac]$$

Главен ефект на  $X_3$

Ефектот на  $X_3$  е разликата во средните вредности меѓу четирите тестови на горната површина и четирите тестови на долната.

$$X_3 = \bar{Y}_+ X_3 - \bar{Y}_{-X_3} = \frac{1}{4n} [c+ac+bc+abc-(1)-a-b-ab]$$

Ефект на интеракцијата  $X_1 X_2$

Мерка за интеракцијата  $X_1 X_2$  е разликата меѓу просечниот ефект  $X_1$  на двете нивоа од  $X_2$  [28]. Конвенционално, половината од оваа разлика се нарекува  $X_1 X_2$  интеракција. Симболично тоа се претставува вака:

$X_2$	Просечен $X_1$ ефект
Горно (+)	$\frac{[(abc - bc) + (ab - b)]}{2n}$
Долно (-)	$\frac{\{[(ac - c) + [a - (1)]]\}}{2n}$
Разлика	$\frac{[abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)]}{2n}$

Бидејќи интеракцијата е една половина од оваа разлика, следи:

$$X_1 X_2 = \frac{[abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)]}{4n}$$

Равенката можеме да ја запишеме и на следниов начин:

$$X_1 X_2 = \frac{abc + ab + c + (1)}{4n} + \frac{bc + b + ac + a}{4n}$$

На сличен начин ги претставуваме и останатите интеракции:

Ефект на интеракцијата  $X_1 X_3$

$$X_1 X_3 = \frac{1}{4n} [(1) - a + b - ac - c + ac - bc + abc]$$



Ефект на интеракцијата  $X_2 X_3$ :

$$X_2 X_3 = \frac{1}{4n} [(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc]$$

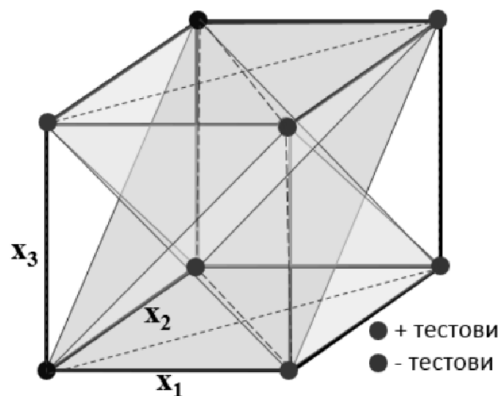
Ефект на интеракцијата  $X_1 X_2 X_3$

Интеракцијата  $X_1 X_2 X_3$  е дефинирана како средна разлика меѓу  $X_1 X_2$  интеракцијата при две различни нивоа на  $X_3$ . Па според тоа:

$$X_1 X_2 X_3 = \frac{1}{4n} \{ [abc - bc] - [ac - c] - [ab - b] + [a - (1)] \}$$

$$X_1 X_2 X_3 = \frac{1}{4n} [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)]$$

На слика (2.9) е прикажана геометриската презентација на интеракција меѓу три фактори.



Слика 2.9. Интеракција меѓу три фактори

Figure 2.9. Interaction between the three factors

Мануелното планирање, изведување и презентирање на резултатите и нивната статистичка обработка е долготрајна и макотрпна работа. При тоа можноста за грешка на некој резултат е голема и во таков случај треба целата процедура да се повтори. Целата постапка е уште подолготрајна ако работиме со три фактори. Користењето на Microsoft Excel значително ја олеснува работата, но и тука постапката е долготрајна и подложна на субјективни грешки [28]. Со користење на софтвер за планирање на експерименти може работата да се заврши за дестина

секунди а можноста за грешка во калкулациите се елиминира така што се фокусираме на стекнување на заклучоци и знаења за системот или процесот. Во нашто планирање го користевме софтверскиот пакет FEED 7.5. Целата постапка со софтверот ја обработивме за да ги добиеме регресивните равенки со кодирани равенки, бидејќи е попрактично отколку со инженерски варијабли. На крај за да се добие одзивот во вистинските единици потребно е да се конвертираат кодирани варијабли во инженерски или натурални варијабли [28]. Релацијата за претворање на варијаблите од еден вид во друг е:

$$X = \frac{X - X_0}{\Delta X}$$

$X$  – инженерска варијабла (фактор),

$X_0$  – средно ниво на инженерската варијабла,

$\Delta X$  – интервал на промена на  $X$ ,

$X$  - е кодирана варијабла.

Најдобра претстава за влијанието на факторите е претставувањето на нивниот ефект графички. Програмата дава можност со избор на 2Д или 3Д графици кои можат да се ротираат до саканата позиција или агол на гледање. Постои можност истиот да се снима како засебен графички фајл (gif, jpg, bmp, ico) и да се испечати. Софтверскиот пакет овозможува и графичка презентација на основните статистички податоци, како што се: минимална и максимална вредност, средна вредност, стандардна девијација, насока на регресија и презентација на сите заедно. Визуелната статистика е овозможена за секој фактор посебно независно од другиот.

На крајот за сработеното може да се креира извештај и тоа:

Извештај како Word документ

Текстуален извештај

Предноста на извештај во форма на Word документ е тоа што можеме да ги користиме сите можности на Word за да го едитираме и зачуваме извештајот. Текстуалниот извештај пак дава можност да креираме извештаи од повеќе

експерименти во еден фајл, негов недостаток е несовременото форматирање на истиот [28].

### **3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН ДЕЛ (EXPERIMENTAL PART)**

#### **3.1. КОРИСТЕНИ МАТЕРИЈАЛИ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТИТЕ (MATERIALS USED FOR EXPERIMENTS)**

Во експериментот се искористени стаклени влакна како зајакнувачи, а за матрицата се употреби термореактивна епоксидна смола.

Три компонентен епоксиден систем од Huntsman беше користен во ова истражување: Araldite® LY1135-1/Aradur 917/Accelerator 960-1. Зацврстувачот кој се користи е анхидриден, а катализаторите амински [23]. Смолниот систем Araldite LY1135-1/Aradur 917/Accelerator 910 претставува смеса од епоксидна смола, анхидриден зацврстувач и амински катализатор. Овој смолен систем е наменет за производство на композити со високи перформанси. Процеси во кои се препорачува да се користи се: технологија на намотување (Filament Winding), Пултрузија (Pultrusion) и технологија со притисок во калап (Pressure Molding). Во табела 3.1 се дадени карактеристиките на компонентите на смолниот систем Araldite® LY 1135-1/Aradur 917/Accelerator 960-1 [23].

Во табелата 3.2 е даден соодносот на компонентите со кој е работено, додека, табела 3.3. ги покажува карактеристиките на смесата. Вискозитетот на смолниот систем на температура од 25 °C е 600-1000 mPas, со зголемување на температурата истата ќе се намалува. Времето на работа (Pot-life) на системот е 56 до 62 часа на температура од 23 °C.

При истражувањето смолата во кадата не беше загреана, што значи времето за работа беше доста долго. Времето на гелирање зависи од избраната температура за печење (80, 100, 110, 120, 130 или 140 °C). Се избра композитните цевки да се печат на температура од 100 °C во време од 6 часа. Бидејќи кадата не беше загреана вискозитетот на смолниот систем беше голема (600-1000 mPas), што е битно да се напомене заради регулирање на соодносот на смола/влакно.

Табела 3.1. Карактеристиките на компонентите на смолниот систем [23]

Table 3.1. Characteristics of the components of the resin system

<b>Araldite® LY 1135 - 1</b>	
Аспект (визуелен)/ Aspect (visual)	Чиста, бледо жолта течност/clear, pale yellow liquid
Боја/Colour (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 <sup>3</sup> ]
Точка на топење/Flash point (ISO 2719)	> 200 [°C]
<b>Aradur ® 917</b>	
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 <sup>3</sup> ]
Точка на топење/Flash point (ISO 2719)	195 [°C]
<b>Accelerator 960 – 1</b>	
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 <sup>3</sup> ]
Точка на топење/Flash point (ISO 2719)	110 - 120 [°C]
Температура на складирање/ Storage temperature	2 - 40 °C [°C]

Табела 3.2. Сооднос на компонентите [23]

Table 3.2. 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 3.3. Карактеристики на смолниот систем [23]

Table 3.3. Characteristics of the resin system

<b>ВИСКОЗНОСТ НА ПОЧЕТНА МЕШАВИНА/ INITIAL MIX VISCOSITY</b> (HOEPPLER, ISO 12058-1B)	[°C] на 25 на 40 на 60	[mPa s] 600-1000 200-300 < 75
<b>ВИСКОЗНОСТ BUILD - UP / VISCOSITY BUILD - UP</b> (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
<b>POT LIFE</b> (TECAM, 65 %RH, 100 G)	[°C] на 23 на 40	[h] 56-62 11-15 18-24 4-7

	[°C]		Систем 1/ System 1	Систем 2/ System 2
<b>ВРЕМЕ НА ГЕЛИРАЊЕ/ GEL TIME</b>	на 80	[min]		52-60
(HOT PLATE)	на 100	[min]	15-21	10-15
	на 110	[min]		5-8
	на 120	[min]		3-5
	на 130	[min]		1,5-3
	на 140	[min]		1-2

Како зајакнувачи во текот на експериментот се користела Е - стаклени влакна тип 185P со финост од 1200tex, производ на компанијата Owens Corning. Стаклените влакна можат да бидат: Е-стакло (подобро електрична спроводливост), С-стакло (висока хемиска отпорност), R-стакло (високи перформанси), А-стакло и Н-стакло (висока специфична јачина на истегнување). Најзастапени се Е и S стаклени влакна. Најчесто користен зајакнувач се стаклените влакна. стаклените влакна се отпорни на корозија и во споредба со другите зајакнувачи се поефтини.

### 3.2. ПРОИЗВОДСТВО НА КОМПОЗИТНИ ЦЕВКИ (PRODUCTION OF COMPOSIT PIPES)

Производството на експерименталните композитни цевки (примероците) за изработката на овој магистерски труд се изврши во лабораториите на Институтот за современи композити и роботика Прилеп.

За производството на композитните цевки се користеа 10 бобини на Е-стаклени влакна од тип 185P со 1200tex. Стаклените влакна беа импрегрирани во системот епоксидна смола Araldite LY564 / Aradur 917 / Accelerator 960-1. Лабораториската машина за намотување на филаменти која се користеше тип MAW FB 6/1 со шест оски - ролерски тип и када за смола се произведени во Микросам АД. Произведените примероци беа со различни дизајни. Стаклените влакна со одредена тензија поминуваат низ кадата со смола каде се импрегнираат пред да се намотаат на мандрелот. Со соодветна брзина на намотување и под одреден агол се намотуваат на ротирачкиот мандрел. Тензијата на влакната да се

контролира е од големо значење за да може да се одржи правецот кога се намоуваат на површината на махдрелот. Агол на намотување е аголот помеѓу влакното и линијата на површината на мандрелот која е паралелна со оската на мандрелот. Тежинскиот сооднос помеѓу влакната и смолата во сите експерименти беше 75:25 wt. %. По намотувањето на влакната на мандрелот, примероците беа печени со индустриски грејач на 80<sup>0</sup>С и на 140<sup>0</sup>С во времетраење од четири часа на двете температури и на крај беа екстрахирани од мандрелот. На слика (3.1.) (а)е прикажана постапката за намотување на влакна во лабораторијата на Институтот за современи композити и роботика како и изгледот на произведените композитни цевки на сл.(3.1)(б).



(a)

(б)

Слика 3.1.(а) Када за импрегнирање, (б) произведени примероци

Figure3.1. (a) Tub for impregnation, (b) produced samples

### 3.3. ПЛАНИРАЊЕ И ДИЗАЈН НА ЕКСПЕРИМЕНТОТ (PLANNING AND DESIGN THE EXPERIMENT)

Статистички добро осмислените експерименти, се ефикасни при планирање на експериментите, добиените податоци даваат валидни и објективи резултати и заклучоци. При изведувањето на експерименти се менуваат една или повеќе процесни варијабли или фактори за да видиме како ќе се одразат на една или повеќе одзивни варијабли.

При планирањето на експеримент се започнува со определување на целите на експериментот и со внимателно избирање на процесните варијабли кои се предмет на истражување. За ефикасност на процесот потребно е детално да се испланираат експерименталните постапки пред да се започне со самиот експеримент[12].

Врз основа на научно и практично искуство избрани се три фактори кои најмногу влијаат на карактеристиките и својствата на композитните цевките:

- Брзината на намотување;
- Затегнатоста на влакната и
- Аголот на намотување.

При тоа користени се две нивоа на варијација. Процесот кој зависи од три фактори  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  и кога секој фактор има две нивоа е така наречен  $2^3$  факторен дизајн. Така, минималниот број на експерименти кои треба да се направат е:

$$N = 2^3 = 8$$

За планирањето на експериментите за магистерската работа користен е полн три-факторен експериментал дизајн, со варирање на три фактори на две нивоа:

- Брзина на намотување ( $x_1$ ) – со минимална брзина од 5,25 m/min, а максимална 21m/min.
- Затегнување на стаклените влакна ( $x_2$ ) – минимална затегнатост од 34 N, а максимална затегнатост од 60 N.
- Агол на намотување ( $x_3$ ) – минимален агол од  $10^0$  и максимален од  $90^0$ .

Составувањето на план- матрицата за експериментот се врши на следниов начин.



- $X_1$  - нивоата се менуваат на секој опит,
- $X_2$  - нивоата се менуваат на секои два опити,
- $X_3$  - нивоата се менуваат на секои четири опити, итн.

Изведени се осум експерименти со варирање на нивото на трите параметри.

Табела 3.4. План – матрица на експериментот

Table 3.4. Plan – matrix of the experiment

Бр. на експ	План-матрица на експериментот								Карактеристики на експериментот		
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1$ $X_2$	$X_1$ $X_3$	$X_2$ $X_3$	$X_1$ $X_2$ $X_3$	$X_1$ брзина на намотувње (m/min)	$X_2$ тензија на vlakна (N)	$X_3$ агол на намот. ( $^\circ$ )
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	21	60	90
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	5.25	60	90
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	21	34	90
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	5.25	34	90
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	21	60	10
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	5.25	60	10
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	21	34	10
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	5.25	34	10

Табела 3.5. Кодирање на варијаблите

Table 3.5. Coding of variables

	Брзина на намотување (m/min)	Трнзија на vlakното (N)	Агол на намотување ( $^\circ$ )
Основно ниво, $x_i=0$	13,125	47	50
Интервал на варијација	7,875	13	40
Горно ниво, $x_i=+1$	5,25	34	10
Долно ниво, $x_i=-1$	21	60	90
Код	$X_1$	$X_2$	$X_3$

Варијацијата на променливата во првата колона е (-1, +1, -1...) на секоја  $2^0$  вредност.

Варијацијата на променливата во втората колона е (-1, -1, +1, +1...) на секоја  $2^1$  вредност.

Во третата колона променливата се менува (-1, -1, -1, -1, +1,+1...) на секоја  $2^2$  вредност,  $n$ -тата варијабла се менува на секоја  $2^{n-1}$ .

Можниот модел за три факторен експеримент од прв ред за процесот на намотување на влкна е:

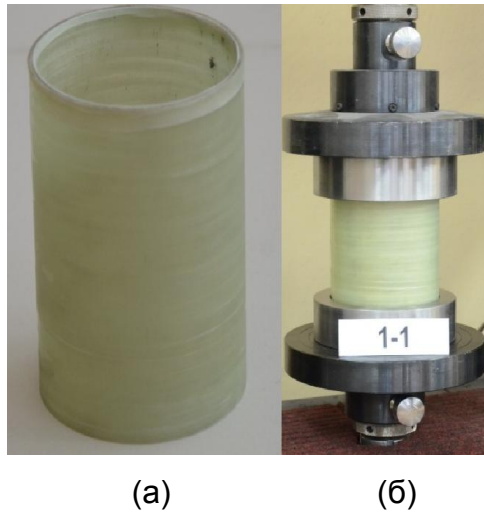
$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 + \varepsilon$$

За  $2^3$  сефакторен експеримент потребни се 8 тестови ( $2^3 = 8$ ), секој тест е со различна комбинација на факторите и нивоата. За секоја комбинација се направени 2 теста, вкупно се извршени 16 тестови[15,16,17].

### **3.4. ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА ЈАЧИНА НА КОМПРЕСИЈА (DETERMINATION OF COMPRESSIVE STRENGTHS)**

Испитувањето на јачината на компресија беше воден според ASTM D5449 стандардот, при тоа се користеа тубуларни тест примероци (слика 3.2).

Според овој стандард од секоја композитна цевка беа вклучени тубуларни примероци за тестирање. При тоа за тестирањето беше направен помшен алат според стандардот ASTM D5449. Тестот за компресија се одвиваше на собна температура со максимално напрегање од 400 МПа и брзина на оптоварување од 0,05 inch/min. Ширината и дебелината на секој тубуларен примерок се мереше со микрометар (со мерливост од најмалку 0,0254 mm). На секој примерок се мери дебелината на четири места, од кои две се на деформираните делови. Ширината на овие места исто така се мереше.



Слика 3.2.(а) Тубуларен примерок; (б) Пробна опрема со примерок за испитување на коп्रेसијата

Figure 3.2 (a) tubular test specimen; (b) Test fixture with specimen for compression testing

Трансверзалната јачина на компресија се песметува со користење на слаеднава равенка:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A}$$

Каде :

A е напречниот пресек,

$$A = \frac{\pi}{4} (OD^2 - ID^2)$$

-ID и OD е среден внатрешен и среден надворешен дијамета

За детерминирање на трансверзалната јачина на компресија се користеа по два примероци добиени со метод на намотивање на филаменти со 100 mm дијаметар и 140mm должина.

Трансверзалната јачина на компресија се определуваше со максимално оптоварување на примерокот до неговиот распад. Значи, главно се определуваше најголемата јачина на компресија на примероците[16,21,28].

За секоја серија на тестови се пресметува аритметичка средина на сите добиени вредности за подоцна да се пресмета „просечената вредност“ за одредуваната карактеристика. Пресметување на стандардното отстапување се прави на следниот начин:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n X_i \right)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2}{n-1}}$$

$$CV = \left( \frac{s}{\bar{X}} \right) \cdot 100$$

каде:

$s$  - проценето стандардно отстапување,

$CV$  - коефициент на варијација на примерокот во %,

$\bar{X}$  - аритметичка средина на сет на набљудувања,

$X$  - вредност на поединечно набљудување,

$n$  – е број на набљудувања

Тестирањето на примероците е направено со универзална машина што се користи за тестирање *јачината на компресија*. Условите за испитување на тест примероците се:  $23 \pm 2$  °C или собна температура и релативна влажност на воздухот од  $50 \pm 5\%$  и тоа не помалку од 24 часа пред да се почне со тестирањето.

### **3.5. ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА СКЕНИРАЧКИ ЕЛЕКТРОНСКИ СНИМКИ (SEM) НА КОМПОЗИТНИТЕ ПРИМЕРОЦИ (DETERMINATION OF SCANNING ELECTRONIC IMAGES (SEM) OF COMPOSITE OF SAMPLES)**

Микроскопите се користат за испитување на внатрешната структура на материјали добиени при одреден технолошки процес или за испитување на последиците од некое механичко оптоварување. Оптичките микроскопи најпрво се појавиле. Додека денес електронските микроскопи имаат најголема примена. Со електронскиот микроскоп може да се видиповрзаноста (интерфејсот) на влакната со смолата, присуство на пукнатини во матрицата, присуството на пори и слично [25-27].

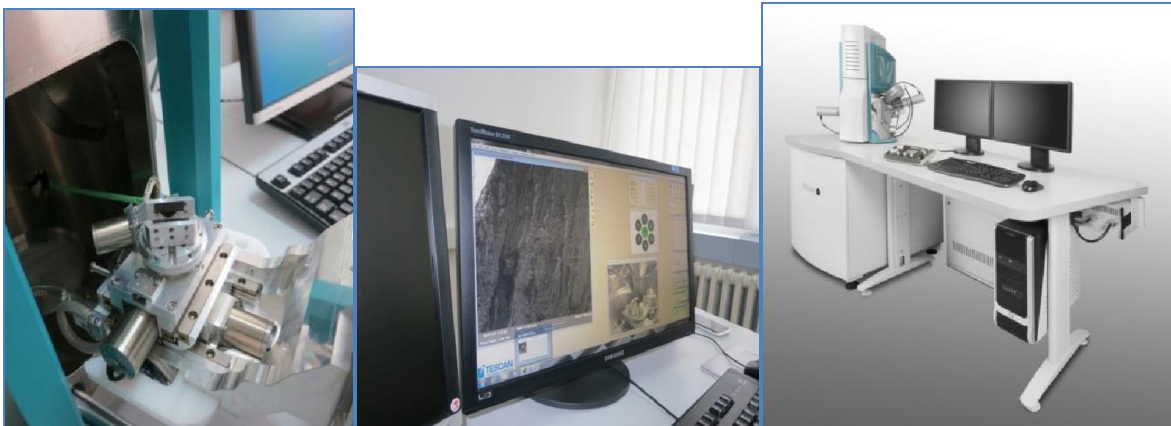
Начинот на работа на овие микроскопи може да се објасни со аналогна споредба. Да претпоставиме дека се наоѓаме во непозната и потполно затемнета просторија. На располагање имаме само една џебна ламба. За да добиеме слика за просторот во кој се наоѓаме, со светилката поминуваме систематски линија по линија од една на друга страна. Така, чекор по чекор, во нашата меморија се создава слика за објектот односно просторијата. Ако го замениме светлосниот сноп на џебната ламба со сноп од електрони, очите со детектор на електрони, а меморијата со флуоресцентен екран и камера, ќе добиеме опис на основниот начин на работа на SEM микроскопот. Да се добие слика на екранот на катодната цевка мора да постои одредена разлика на сигналот од различни делови на примерокот. Посветлиот дел од сликата припаѓа на делот од примерокот од кој се емитува појак сигнал. Топографија на примерокот е визуелно проучување на особините на површината на примерокот:

а) Со секундарни електрони ја набљудуваме топографијата на примерокот чија што површина не е мазна. Топографскиот контраст настанува поради различните емисии од секундарните електрони на испакнатините (светло) и вдлабнатините (сенки). Емисијата се зголемува на рабовите и на ситните честички кои се наоѓаат на површината на примерокот.

б) Топографски контраст може да се добие и со наназад распрснати електрони. Ваквата слика ќе изгледа како слика на примерок набљудуван со паралелен сноп

од светлина и таа ќе има повеќе сенки од сликата добиена со секундарни електрони.

За да се истражат интрфејсот меѓу влакно и матрица, местата на кинење и областите каде не настанало кинење, изработени се слики на скенирачки електронски микроскоп од фирмата Tescan во електронската лабораторија во УГД Штип. На слика 3.3 е даден сканинг електронскиот микроскоп (SEM) кој се користеше за добивање на електронски слики за тестираните композитни прстен примероци за истражувањето во рамките на оваа магистерска работа.



**Слика 3.3.** Скенирачки електронски микроскоп Tescan

**Figure 3.3.** Scanning electron microscope Tescan

#### 4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА (RESULTS AND DISCUSSION)

Во рамките на оваа магистерска работа беа произведени композитни цевки со користење на 10 бомбини E – стаклени влакна со финост од 1200 tex. Стаклените влакна пред да се намотаат на мандрелот прво се импрегнираат во полимерната матрица која во нашиот случај е епоксидниот смолен систем.

При ова истражување беа произведени повеќе композитни цевки со различен агол на намотување, цевки со различна брзина на намотување на импрегнираните стаклени влакна како и цевки со различна тензија на намотување на влакната. Се направија различни дизајни на композитни цевки според план матрицата на експериментот. Другите параметри кои влијаат на крајните карактеристики на композитните цевки како што се: процентот на полимерна матрица со која се натопени влакната, вискозитетот на смолниот систем и друго, беа земени како константни вредности. Вредностите за останатите параметри беа одредени врз основа на искуството во добивање на композитни структури во Институтот за современи композити и роботика во Прилеп, каде што и се изработуваа лабораториските експерименти за овој труд. Врз основа на тоа беа дефинирани следните параметри за процесирање:

- Масениот сооднос на влакната и смолниот систем за сите композитни цевки беше земен 75:25 мас. %

- Вискозитетот на смолниот систем 800 mPa s.

- Како променливи параметри беа:

- а) аголот на намотувања и беа направени композитни примероци (цевки) со различни агли на намотување: 10° и 90°.

- б) брзина на намотување : 5,25 m/min и 21m/min.

- в) затегнување на стаклените влакна: 34 N и 60 N.

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 ( $\pm\theta$ ). Меѓутоа многу често може да се намотуваат влакната под агол блиску до 90° или под агол блиску до 10° (во краен случај). Со менување на аголот на намотување на влакната во однос на оската на

мандрелот, може да се добијат композитни структури кои можат да издржат различни оптоварувања во насока на влакната[28-30].

#### 4.1.ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА РЕГРЕСИОНА РАВЕНКА Т.Е. РАВЕНКА ЗА МОДЕЛ ОД ПРВ РЕД СО ТРИ ФАКТОРИ (DETERMINATION OF REGRESSION EQUATION I.E EQUATION MODEL FROM PRIMARILY THREE FACTORS)

Од тестовите извршени на примероците се пресмета јачина на компресија на примероците. За  $2^3$  се факторен експеримент потребно беше да се направат 8 тестови ( $2^3 = 8$ ), секој со различна комбинација на факторите и нивоата. Со оглед на тоа дека за секоја комбинација се направија по 2 теста (2 реплики), вкупно се извршени 16 тестови. Резултатите од секој тест (со соодветното ниво на факторите) се претставени во табелата 4.1.

Бидејќи секоја од осумте експерименти се реплицираше, беше потребно да се определи дисперзијата на истите [28]. Пресметката на дисперзијата се направи по равенката:

$$S_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (y_{ji} - \bar{y}_i)^2$$

За првиот експеримент одзивите се 289,71 и 309,01, а нивната средна вредност е 299,395, вредноста на дисперзијата ќе биде:

$$S_1^2 = \frac{1}{2-1} \sum_{i=1}^2 (289,71 - 299,395)^2 + (309,08 - 299,395)^2 = 187,598$$

На истиот начин се пресметува дисперзијата и за останатите тестови. Резултатите од пресметките за дисперзијата се дадени во табела 4.1. [15]



Табела 4.1. Експериментална матрица со резултатите од трансверзалната јачина на копесија

Table 4.1. Experimental matrix with transverse compressive strength results of tubular tests

Бр. на експ.		План-матрица на експериментот								Резултати од компресијата				
		X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	A (mm) <sup>2</sup>	F(kN)	F <sub>сп.</sub> (kN)	σ (MPa)	σ <sub>сп</sub> (MPa)
1	1-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	11,71	3392,5	3453,7	289,71	299,395
	1-2									11,37	3514,2		309,08	
2	2-1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	10,03	2358,5	2241,8	235,14	238,235
	2-2									10,70	2582,2		241,33	
3	3-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	10,87	3263,9	3389,1	300,27	304,675
	3-2									11,37	3514,2		309,08	
4	4-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	11,54	3518,4	3455,5	304,89	297,3
	4-2									11,71	3392,5		289,71	
5	5-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	10,95	1070,6	1048,8	97,77	95,4
	5-2									11,04	1027,1		93,03	
6	6-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	10,03	792,37	805,07	79,00	78,93
	6-2									10,37	817,78		78,86	
7	7-1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	10,20	913,92	938,14	89,60	89,77
	7-2									10,70	962,36		89,94	
8	8-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	10,03	1127,9	1086,9	112,46	109,205
	8-2									9,87	1045,7		105,95	

Табела 4.2. Резултати од пресметката на дисперзијата  
 Table 4.2. Results of dispersion

Експеримент	$y_{j1}$	$y_{j2}$	$\bar{y}$	$S_j^2$
1	289,71	309,08	299,395	187,5985
2	235,14	241,33	238,235	19,15805
3	300,27	309,08	304,675	38,80805
4	304,89	289,71	297,3	115,2162
5	97,77	93,03	95,4	11,2338
6	79,00	78,86	78,93	0,0098
7	89,6	89,94	89,77	0,0578
8	112,46	105,95	109,205	21,19005

Средната вредност на дисперзијата се пресметува според равенката:

$$S_j^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2$$

$$S_j^2 = \frac{1}{8} \sum_1^8 187,5985 + 19,15805 + 38,80805 + 115,2162 + 11,2338 + 0,0098 + 0,0578 + 21,19005 = 49,15903$$

По пресметката на средната дисперзија, го пресметуваме Кохреновиот критериум т.е. за проверка на пресметките за експериментите се наоѓа односот на секоја проценка на дисперзијата и сумата од сите проценки на дисперзијата [15,28]:

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}$$

Ако замениме во равената во равенката:

$$G_p = \frac{187,598}{393,2722} = 0,477019$$

$G_p$  - претставува пресметана вредност на Критериум на Кохерен и споредува со табеларната вредност на Кохерен  $G_{\alpha,f,N}$ , во зависност од нивото на значајност  $\alpha$ , бројот на степени на слобода,  $f$  ( $f = N(k-1)$ ) и бројот на опити  $N$ .

Нивото на значајност најчесто во пресметките се зема за 0,05 што значи дека во пресметките допуштаме само 5% или сметаме дека добиените резултати се пресметани со точност од 95%.

Редот на дисперзии се смета за хомоген ако:

$$G_{пресм.} \leq G_{\alpha,f,N}$$

Кохреновиот критериум е  $G_{\alpha,f,N} = 0,6798$  според критичните вредности за горно ниво 0,05, што значи дека е исполнет условот. Тоа пак значи репродукцибилност на експериментите, а проценката на дисперзијата е хомогена. По пресметките на дисперзија на експериментите врз основа на полн факторен експеримент потребно е да се пресметаат регресионите коефициенти:  $(\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}, \beta_{123})$ . Вредноста на некои коефициенти може да биде занемарливо мала т.е. незначајна. Значајноста на регресионите коефициенти се определува со помош на Студентовиот (Student) критериум [28]. Да се утврди дали се значајни треба да се процени варијацијата при која се определуваат.

$$S_\beta = \sqrt{\frac{S_j^2}{N}}$$

$$S_\beta = \sqrt{\frac{49,15903}{8}} = 2,478886$$

Кај сефакторниот план на експерименти сите коефициенти се определуваат со еднаква грешка т.е. точност. Се зема дека коефициентите на регресија се значајни ако е исполнет условот:

$$|\beta| \geq S_{\beta}t$$

Асолутната вредност на коефициентот на регресија треба да е поголем во однос на табеларната вредност на Студентовиот критериум.

t –табеларната вредност на Студентовиот критериум за P=0, 95 и f = 8, изнесува t = 2, 31.

Вредноста на степените на слобода ја одредуваме од релацијата:

$$f = N(k-1) = 8(2-1) = 8$$

Во случај кога не е задоволен критериумот, тогаш коефициентот на регресија се изостава како незначаен т.е. невлијателен коефициент во регресионата рвенка [28].

$$|\beta| \geq S_{\beta}t \geq 2,478886 \cdot 2,31 \geq 6$$

Ова значи дека за нашиот експеримент секој коефициент по апсолутна вредност треба да биде поголем или еднаков на 6. Претходно треба да ги пресметаме вредностите на секој коефициент од равенкат за модел од прв ред со три фактори:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 + \varepsilon$$

Коефициентот  $\beta_0$  претставува средна вредност од сите одзиви ( $\bar{y}$ ):

$$\beta_0 = \frac{299,395 + 238,235 + 304,675 + 297,3 + 95,4 + 78,93 + 89,77 + 109,205}{8} = 189,1138$$

Другите коефициенти од равенката се пресметуваат преку следниве равенки:

$$\beta_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_i; \quad \beta_{im} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{im} y_i \quad (i \neq m)$$

$X_{ij}$  -се кодираниите вредности на коефициентите  $X_i$ .

За да може да се пресметат кодираниите вредности на факторите се составува табела од комбинации на варијаблите во експериментот и границите на нивното варирање т.е. максималната и минималната граница. Кодираниите вредности се потребни за да се определи знакот пред коефициентите ( $\beta_j$ ). Тие се пресметуваат по формулата:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i_0}}{\Delta X_i}$$

$X_i$  -е реална променлива;

$X_{i_0}$  - средна вредност на границите на варирање;

$\Delta X_i$  – интервал на промена на границите на варирање.

За да сме сигурни во точноста на пресметаните кодирани вредности на факторите, треба да имаме предвид дека кога работиме со максималната граница на променливата, коефициентот  $x_i$  секогш добива вредност +1, додека кога се работи со минималната граница на променливата тој добива вредност -1 (табела 4.3). Во табелта се дадени пресметаните вредности на коефициентите  $\beta_i$  од каде што може да се забележи дека коефициентите  $\beta_1, \beta_2, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}, \beta_{123}$  по апсолутна вредност се помали од 0,288 т.е. се незначајни за експериментирањето па така може да се изостават во регресионата равенка односно равенката за модел од прв ред со три фактори [28].

Табела 4.3. Вредности на коефициентите  $\beta_i$ .

Table 4.3 Values of the coefficients  $\beta_i$ .

N	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	$\bar{y}$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	299,395
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	238,235
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	304,675
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	297,3
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	95,4
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	78,93
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	89,77
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	109,205

$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_{12}$	$\beta_{13}$	$\beta_{23}$	$\beta_{123}$
189,1138	-8,1963	11,1238	-95,788	11,211	8,9375	-0,49	-12,235

Според ова регресивнта равенка со кодираните вредности ќе биде:

$$y = 189,1138 - 8,1962 x_1 + 11,123 x_2 - 95,788 x_3 + 11,211 x_1 x_2 + 8,937 x_1 x_3 - 0,496 x_2 x_3 - 12,2 x_1 x_2 x_3$$

Доколку се елиминираат деловите од равекната каде коефициентите по апсолутна вредност се помали од 6, тогаш равенката со кодирани вредности ќе го добие следниот изглед [15,17]:

$$y = 189,1138 - 8,1962 x_1 + 11,1238 x_2 - 95,788 x_3 + 11,211 x_1 x_2 + 8,9375 x_1 x_3$$

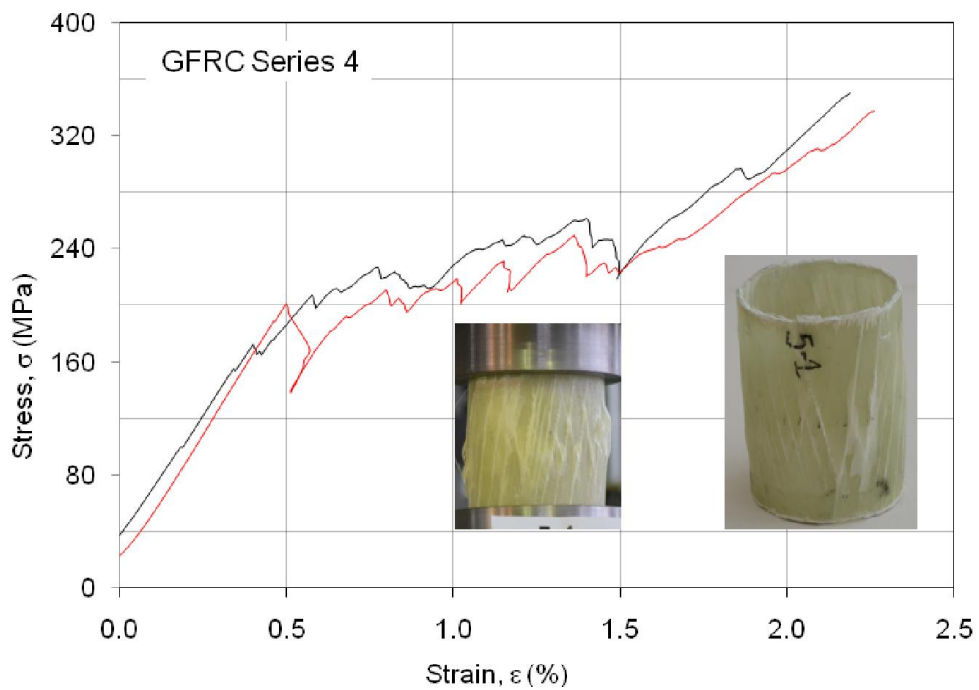
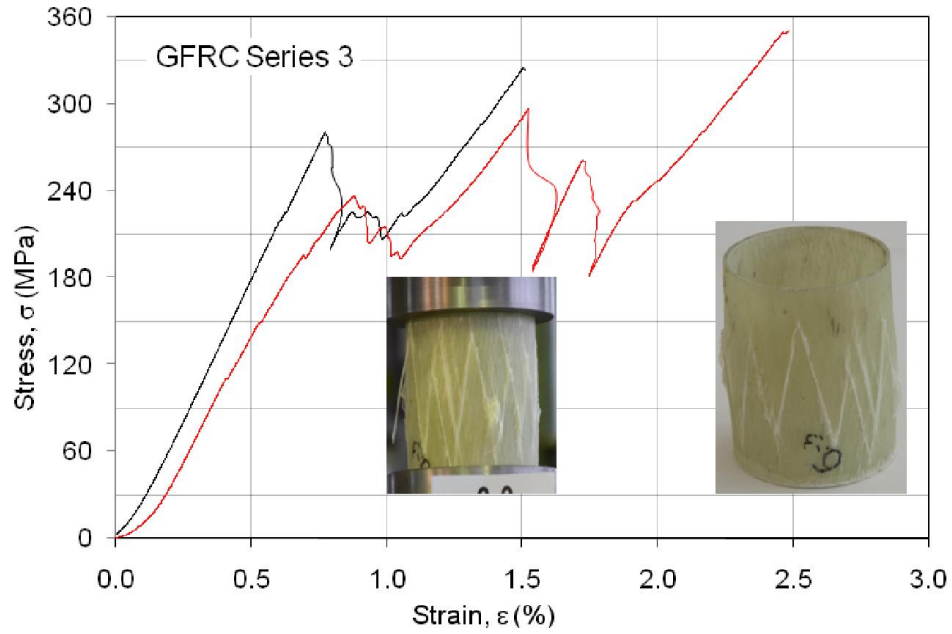
Од регресивната равенка може да се забележи дека најголемо влијание на јачината на компресија има аголот на намотување како процесен параметар X<sub>3</sub>, а останатите два фактора, брзина на намотување и тензија на намотување на влакната имаат многу малку влијание врз јачината на композитите. Исто така, се

забележува дека постои интеракција меѓу факторите која исто така многу малку влијае на јачината на композитните цевки.

Трансверзалната јачина на компресија е обратнопропорционална од аголот на намотување на влакната, што би значело, колку е поголем аголот на намотување, помала е јачината на компресија на композитните цевки. Од резултатите во табела 4.1. може да се забележи дека примероците од 5 до 8 кои се намотани под агол од  $10^{\circ}$ , покажуваат најголеми вредности за јачината на компресија кое одговара со факторот на влијание од регресионата равенка. Примероците со ознака од 1 до 4 кои се добиени со агол на намотување  $90^{\circ}$ , покажуваат многу пониски вредности и тоа за околу 50% помали од оние добиени со агол на намотување на влакната  $10^{\circ}$ . Од добиените резултати може да се забележи дека трансверзалната јачина на компресија на композитните примероци добиени со технологијата за намотување на филаменти значително зависи од аголот на намотување. Исто така може да се забележи дека врз јачината на компресија помало влијание имаат факторот на затегнатоста на влакната и факторот на брзината на намотување на влакната. Интеракцијата на двата фактори има незначително позитивен ефект на одзивот т.е. на јачината при компресијата [10].

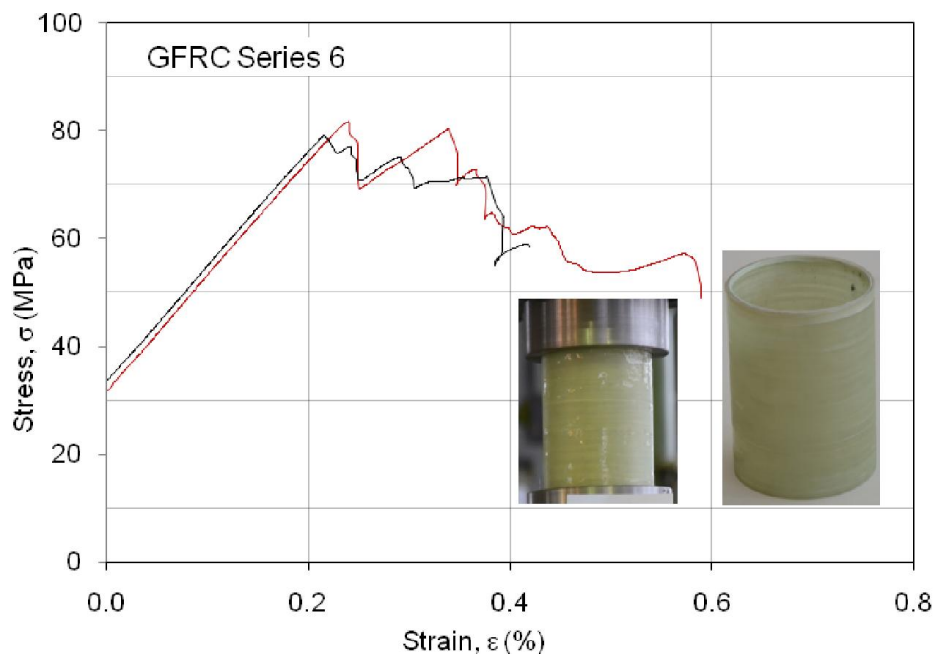
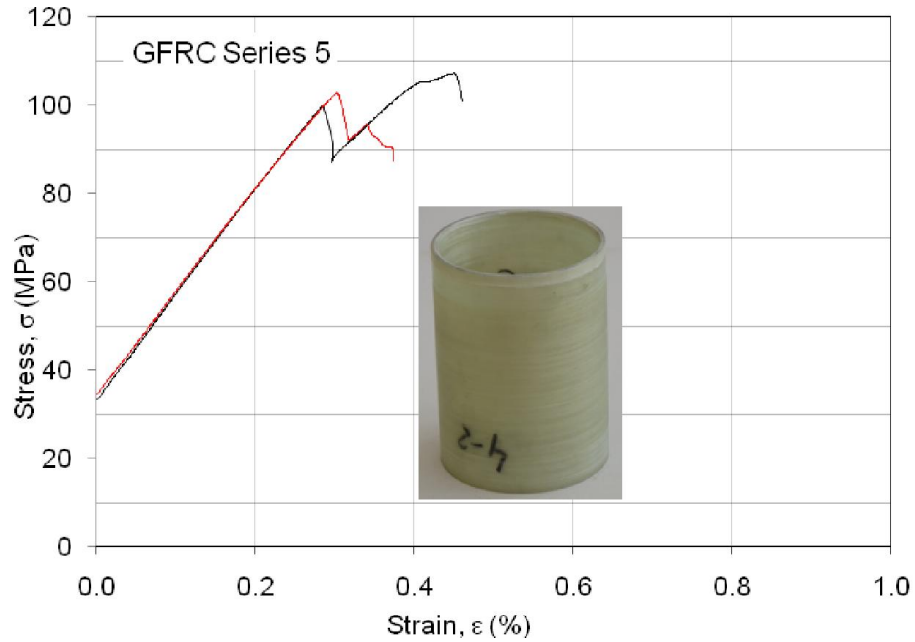
На слика 4.1 и слика 4.2 се прикажани типични криви напрегање – деформација (stress – strain) за јачина на компресија за композитни цевчести примероци добиени со агол на намотување  $10^{\circ}$  (серија 3 и 4) и за композитни примероци добиени со агол на намотување  $90^{\circ}$  (серија 5 и 6).

На слика 4.3 прикажани се слики од тестирањата на примероците добиени со агол на намотување на влакната  $10^{\circ}$  и  $90^{\circ}$ .

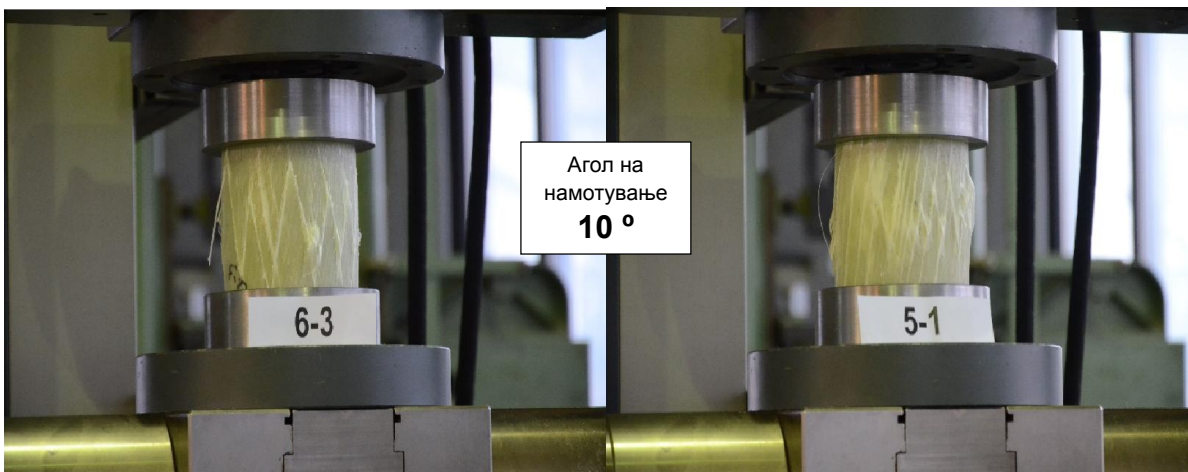


Слика 4.1. Напрегање – деформација криви на композитни цевчести примероци (со агол на намотување  $10^0$ ) добиени од универзалната машина за тестирање  
 Figure 4.1. Stress and strain graphs of composite tubular samples (the angle of winding  $10^0$ ) from universal tensile testing machine





Слика 4.2. Напрегање – деформација криви на композитни цевчести примероци (со агол на намотување  $90^0$ ) добиени од универзалната машина за тестирање  
 Figure 4.2. Stress and strain graphs of composite tubular samples (the angle of winding  $90^0$ ) from universal tensile testing machine



Слика 4.3. Тестирање на композитни прстен примероци со агол на намотување на влакната  $10^\circ$  и  $90^\circ$

Figure 4.3. Testing of the composite ring samples with winding angle  $10^\circ$  and  $90^\circ$

Од графици се гледа дека јачината на компресија е функција од притисокот кој се користи врз тубуларните примероци. Од графикот за серија 4 и серија 5 во кој се користени примероци се добиени со агол на намотување  $10^\circ$  може да се види дека притисокот на кој се деструктуираат (рушат) примероците е многу поголем од оној кој е искористен за серија 5 и серија 6 каде аголот на намотување на примероците  $90^\circ$ . Во текот на процесот на намотување на филamenti како расте дијаметарот на намотаната цевка, така се формираат слоеви така што растојанието меѓу слоевите расте. При намотувањето, празнините кои се исполнети само со

смола се критичните места кои дозволуваат лесно уништување на примерокот. Затоа во серија 5 и серија 6 уништувањето на примероците беше побрзо, тие се распаднаа на местата кои беа богати со смола т.е. покажаа мала јачина на компресија. Деструкцијата на цевчестите примероци беше различна. Во споредба со примероците добиени со агол на намотување на влакната од  $10^0$ , цевчестиот примерок покажа отпорност на не многу висока сила на компресија. Всушност, отпорноста што ја покажа се должи на јачината на епоксидната смола, бидејќи влакната во тие примероци се во правец каде што нивната ефикасност не е искористена. При деструкцијата на примероците не се создаваше звук. Кај овие примероци насоката на влакната не е во правецот на дејствување на силата на притисок односно јачината на овие приметоци зависи само од јачината на полимерната матрица. За разлика од нив, кај примероците намотани со влакна под агол од  $10^0$  (серија 3 и серија 4), силата на притисок е во насока на влакната. На тој начин, со постојано зголемување на притисокот во правецот на филаментите, кривите се во зиг-заг форма што кореспондира со постепено пукање на слоевите од надвор кон внатре. Распаѓањето на примероците исто така беше проследено со звук на кршење т.е. пукање. Во процесот на намотување на филаменти намотувањето на филаментите е во еден правец и филаментите не се преплетуваат меѓу себе. Вака намотаните цевки се лесно кршливи и помалку отпорни на притисок на компресија. Ако постојат преплетени филаменти тие ќе се однесуваат како точки во кој ќе се стопира процесот на пукање т.е. уништување на примерокот [9, 10].

Композитните материјали се типични анизотропни материјали, со промената на аголот на намотување на влакната се очекува и промена на перформансите на структурата. Кога композитниот материјал ќе се оптовари во насока на влакната покажува најдобри механички карактеристики. Во услови кога примерокот се наоѓа под притисок, како се менува аголот на намотување така се очекува таа да покаже анизотропно однесување. Кај прстенестата структура како се намалува аголот на намотување на влакната тие доаѓаат блиску до насоката на оптоварување, а за агол на намотување  $10^0$  влакната се во иста насока со силата која дејствува на структурата и затоа таа конфигурација покажува највисока јачина. Колку е помал

аголот на намотување на влакната јачината во отпорноста на композитниот примерок во аксијална насока ослабува. Внатрешниот притисок во композитните цевки претставува комбинирано оптоварување во двете насоки и затоа максимални перформанси може да се постигнат кога ќе се избере агол на намотување на влакната што може да ја оптимизира отпорноста на прстенот во сите насоки [9, 10].

Од добиените и анализирани резултати може да се заклучи дека механичките својства на композитните цевки добиени со намотување на филаменти зависат најмногу од аголот на намотувањето на влакната. Композитите со помали агли на намотување на влакната обезбедуваат композитни цевки со поголема јачина на компресија.

На слика 4.4 дадени се сликите на испитани композитни прстени добиени со агол на намотување  $90^\circ$  и  $10^\circ$  и начинот на нивна деструкција после тестирањето.

Може да се забележи дека постои различен начин на деструкција кај примероците со различен агол на намотување. Кај примероците со агол на намотување од  $10^\circ$  силата на компресија делува во правец на влакната и затоа отпорот е поголем. Додека, кај примероците со агол на намотување од  $90^\circ$  силата на компресија делува нормално на намотаните влакна и отпорот е помал и нивната издржливост е помала.



*Композитни примероци со 10°*



*Композитни примероци со 90°*

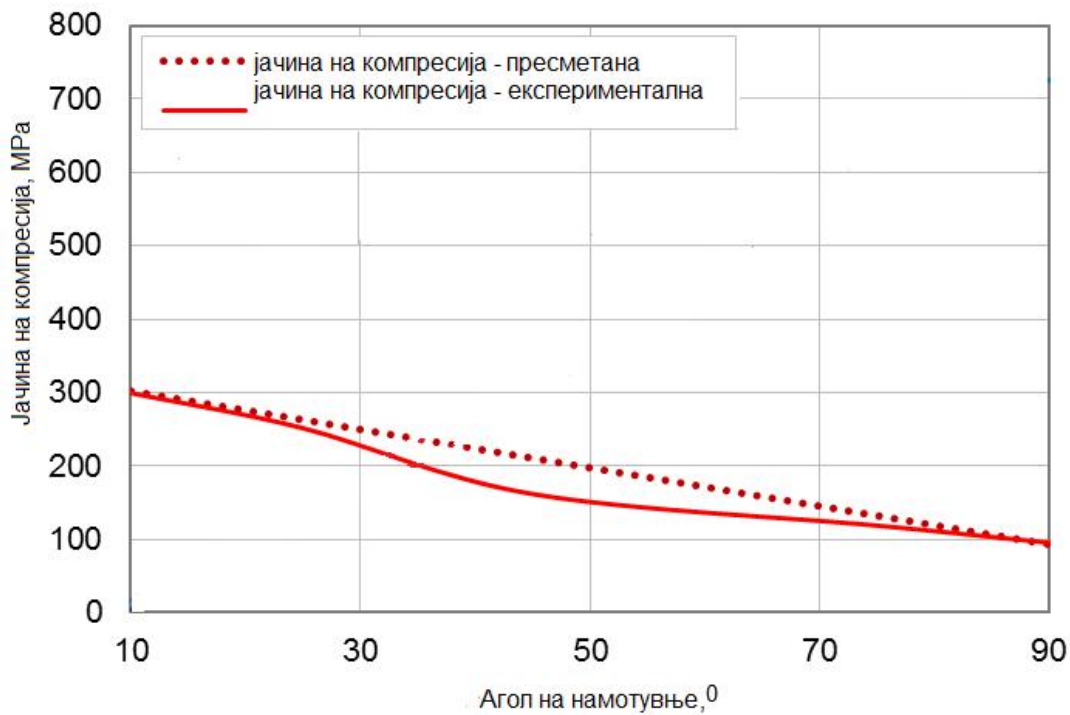
Слика 4.4. Приказ на деструктурирани примероци со различен агол на намотување после испитувањето на јачина на компресија

Figure 4.4. Failure of samples with different angle of winding, after examining the compression strength

Во рамките на оваа магистерска работа беше направена и проверка на применетиот полн три факторен експериментален дизајн и добиениот модел кој најдобро го опишува процесот. За таа цел, теоретски пресметаните вредности за јачината на компресија беа споредувани со експериментално добиените. Беа направени пет композитни цевки со различен агол на намотување на влакната од 10, 25, 45, 75 и 90°, а со иста брзина на намотување од 5,25 m/min и тензија на влакната од 34 N. Проверката на моделот може да биде направена за композитни цевки произведени со било која друга вредност за брзината на намотување и за тензијата на влакната која припаѓа во предвидениот опсег. Резултатите од направената проверка се прикажани графички на слика 4.5. Од прикажаните добиени вредности за јачината на компресија за испитаните композитни цевки и добиените вредности пресметани според добиениот модел, може да се забележи дека нема големо отстапување на експерименталните вредности од пресметаните.

Пресметаните вредности формираат права линија што кореспондира со добиениот линеарен модел од прв ред, а експериментално добиените вредности

ја формираат испрекинатата линија што е многу блиску до правата линија. Тоа покажува дека добиениот модел добро го опишува процесот и дека може да се користи за добивање на вредности за јачината на компресија под различни услови во предвидениот опсег, а притоа без да се прават експерименти [28].



Слика 4.5. Механички својства на композитните цевки во однос на аголот на намотување

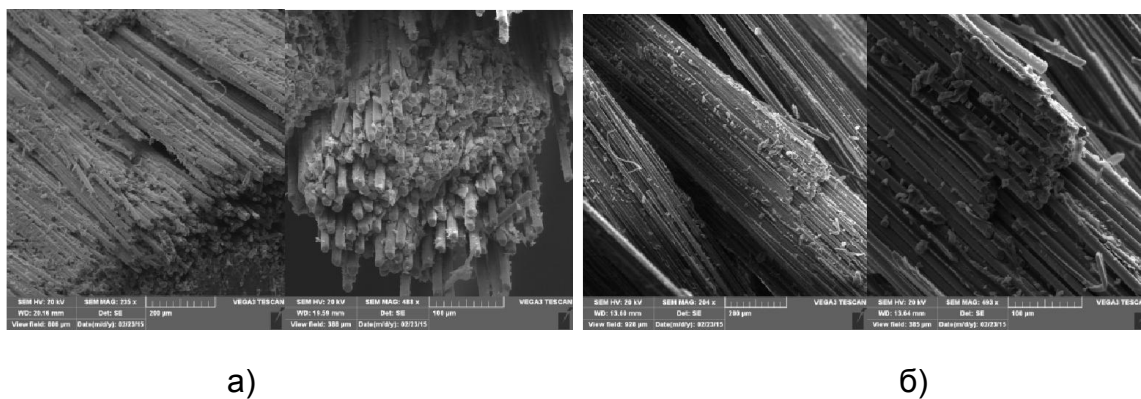
Figure 4.5. Mechanical properties in ratio of winding angle of the fiber in the composite pipes

## 4.2. СКАНИНГ ЕЛЕКТРОНСКА МИКРОСКОПИЈА (SEM) НА ТЕСТИРАНИТЕ КОМПОЗИТНИ ЦЕВКИ (SCANNING ELECTRON MICROSCOPY (SEM) OF THE TESTED COMPOSITE PIPES)

Анализата со помош на сканинг електронската микроскопија (SEM) беше направена со цел да се види дали стаклените влакна се добро натопени со смола односно дали се добро импрегнирани и каква е поврзаноста меѓу нив во текот на процесот на нивно намотување.

Направени беа снимки во надолжен и попречен правец на тест примероците со различни зголемувања. Снимките беа направени на веќе тестираните примероци. Добиените SEM микрофотографии се прикажани на слика 4.6 а) и б).

Од добиените SEM слики за примероците со агол на намотување од  $10^\circ$  (под а) јасно се гледа паралелноста и поврзаноста на влакната и матрицата кои се во насока на дејствување на силата, како и прекилот на влакната. Кај SEM снимките за примероците со агол на намотување од  $90^\circ$  (под б) може да се забележи многу мало оштетување на влакната затоа што прекилот е направен преку пукање на матрицата.



Слика 4.7. SEM микрофотографии на пукнатите делови од композитните прстен примероци

Figure 4.7. SEM photographs of the cracked parts of the composite ring samples

## 5.ЗАКЛУЧОК (CONCLUSION)

Врз основа на направеното истражување во рамките на оваа магистерска работа може да се заклучи следното:

- Беше направено дизајнирање т.е. планирање на експериментите за технолошкиот процес на намотување на влакна (filament winding technology) и врз основа на план матрицата беа направени/произведени 8 модели композитни цевки.

- При дизајнирањето на процесот беа земени три параметри кои најмногу влијаат на експериментите: брзина на извлекување, тензија на влакна и агол на намотување и беше користен три факторен метод за планирање на експерименти со две нивоа на варијација  $2^3$ .

- За сите произведени композитни цевки беше тестирана јачината на компресија.

- Врз основа на добиените експериментални податоци, а земајќи во предвид дека експериментите беа реплицирани, беше определена дисперзијата за сите 8 експерименти и врз основа на Кохреновиот критериум беше определено дека експериментите се репродуктивни.

- Кај овој план на експерименти беа пресметани сите коефициенти со еднаква грешка т.е. точност, а врз основа на Студентовиот критериум беше определена значајноста на факторите за процесот. Имено, факторите кои имаа мало влијание на процесот беа изоставени во крајната регресиона равенка.

- Беше добиена регресиона равенка која најдобро го опишува процесот при што беше добиено дека најголемо влијание има аголот на намотување на влакна врз јачината на истегнување, а другите два фактори имаат многу помало влијание.

Се направи проверка на моделот за да се потврди дали равенката математичкиго опишува процесот. Беа произведени композитни цевки со различен агол на намотување на влакната од 10, 25, 45, 75 и  $90^0$ , а со иста брзина на намотување од 5,25 m/min и тензија на влакната од 34 N. Тие композитни цевки беа



експериментално тестирани за јачина на компресија, а паралелно според добиената регресиона равенка беа и теоретски пресметани вредностите за јачината. Врз основа на направените пресметки заклучивме дека моделот сосема добро го опишува процесот дека може да се користи за добивање на вредности за јачината на компресија под различни услови во предвидениот опсег, а притоа без да се прават експерименти.

- Преку дизајнот на технолошкиот процес за производство на композитни цевки се покажа значењето од постоењето на начини и методи за оптимално планирање на експериментите, кои овозможуваат суштествено да се скратат времето и материјалните трошоците при извршување на истражувањето.

- Примената на методи за планирање на експериментите овозможува решавање на многу проблеми во хемиската технологија, како и во останатите гранки од инженерството кои се поврзани со изведување на сложени и скапоцени експерименти.

- Беше направена и СЕМ микроскопска анализа на примероците после тестирање. Беа направени снимки во надолжна и попречна насока и на местата каде е настанат прекин во текот на испитувањата.

- Од направените СЕМ микрофотографии јасно се гледа структурата на композитните слоеви како и настанатите прекини на влакната и матрицата.

- СЕМ микрофотографиите покажаа дека влакната се добро импрегнирани со смола и дека се добро поврзани меѓу себе.

Со технологијата на намотување на филаменти се добива можност за производство на цилиндрични и сферични форми т.е. може да се искористи за производство на резервоари, цистерни за хемикалии, гориво, како и за производство на цевки. Цевките што се добиени со процес на намотување на филаменти се добра замена за корозивните челични и метални цевки за масло, гас и вода. Освен тоа, цевките добиени со овој процес се трајни, издржливи на високи притисоци.

## 6. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

- 1) A C. Long (2005). Design and manufacture of textile composites. Woodhead Publishing Limited.
- 2) L. L. Sobrinhoa, V. M. Caladob and F. L. Bastian. Development and Characterization of Composite Materials for Production of Composite Risers by Filament Winding. *Materials Research*, 14(3): 287-298, 2011.
- 3) Daniel Gay, Suong V. Hoa (2007) *Composite Materials: Design and Applications*, Second Edition, CRC Press, Taylor & Francis.
- 4) M. M. Schwartz, (1984) "Composite materials handbook" McGraw-Hill.
- 5) G.I. Williams, R.P. Wool, *Appl. Comp. Mater.*, 7, 421 (2000).
- 6) A.K. Mohanty, M. Misra and L.T. Drzal, *Composite Interfaces*, 8, 313 (2001).
- 7) Suong V. Hoa, (2009) "Principles of the manufacturing of composite materials" by DEStech Publications, Inc., Chapter 5 page 205-231, 343.
- 8) G.Ruxton, N.Colegrave, *Experimental Design for the Life Science*, Oxford University Press, 2013.
- 9) L. L. Sobrinhoa, V. M. Caladob and F. L. Bastian. Development and Characterization of Composite Materials for Production of Composite Risers by Filament Winding. *Materials Research*, 14(3): 287-298, 2011.
- 10) Д.Димески, В.Сребренкоска, е-библиотека Механички својства на текстилни материјали, Универзитет Гоце Делчев – Штип, 2014. [www.huntsman.com](http://www.huntsman.com).
- 11) ASTM D 2290 Standard. Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe by Split Disk Method. An American National Standard, 2003.
- 12) N. Akkus, G. Genc and C. Girgin. Control of the presentation in Filament winding process. *Acta mechanica et automatica*, vol.2 (3), 2008.
- 13) D. Cohen. Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength. Elsevier Science Limited, Composites Part A 28A 1035-1037 G', 1997.

- 14) Stanley T. Peters, Yu. M. Tarnopol'skii, A. I. Beil, "Handbook of Composites" Chapter - Filament Winding, Pages 456-475 Springer US, 1998.
- 15) Srebrenkoska Vineta, Risteska Svetlana, Srebrenkoska Sara, *Production of filament wound composite tubes for construction*. In: Present and Future of FRP in Construction, 23 Oct 2014, Technical University-Kaiserslautern, Germany, 2014.
- 16) Sara Srebrenkoska, Biljana Pop-Metodieva, Silvana Krsteva, Simona Naseva, Vineta Srebrenkoska, *Design of polymer composite pipes produced by filament winding technology*, In: VII International Congress "Contemporary Materials, 22-24 December, Banja Luka, Bosnia and Hercegovina, 2014.
- 17) Simona Naseva, Vineta Srebrenkoska, Svetlana Risteska, Maja Stefanovska, Sara Srebrenkoska, *Effect of winding angles on mechanical properties of filament wound pipes*, In: IV International Congress "Engineering, Environment and Materials in Processing Industry, Jahorina, Bosnia and Hercegovina, 2015.
- 18) Simona Naseva, Vineta Srebrenkoska, Svetlana Risteska, Maja Stefanovska, Sara Srebrenkoska, *Mechanical properties of filament wound pipes: effect of winding angles*, Quality of Life (in press), 2015.
- 19) J.Goupy, L.Creighton, Introduction to Design of Experiments, SAS Publishing, 2007.
- 20) A.Dean, D.Voss, Design and Analysis of Experiments, Springer-Verlag New York, Inc. 1999.
- 21) D. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, 5th Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2001.
- 22) Н.Спирин, В.Лавров, Методи планированија и обработки резултатов инженерного експеримента, ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, Екатеринбург, 2004.
- 23) В.Риков, В. Иткин, Математическаја статистика и планирование експериментата, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, 2008.
- 24) И. Агајинц, А. Орлов, Планирование експеримента и анализ данних, МИТХТ, Ломоносов, Москва, 1998.
- 25) С.А. Семонов, Планирование експеримента в химии и хемическој технологији, Москва, 2005 ([www.mitht.ru/e-library](http://www.mitht.ru/e-library)).

- 26) Ф. С. Новик and Я. Б. Арсов. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. Москва, Машиностроение, 1980.
- 27) Dean and D. Voss. Design and Analysis of Experiments. Springer-Verlag New York, 1999.
- 28) Д.Димески, В.Сребренкоска, е-библиотека Дизајн и анализа на експерименти, Универзитет Гоце Делчев – Штип, 2014.

## ЛИСТА НА ТАБЕЛИ

Табела 2.1. Продукти од методот на намотување на филменти: апликација / систем на смола

Табела 2.2. Матрица на дизајнот на експерименти од типот  $2^3$

Табела 2.3. Проширена матрица на дизајнот на експериментот

Табела 2.4. Матрица на главните ефекти и нивните интеракции

Табела 3.1. Карактеристиките на компонентите на смолниот систем

Табела 3.2 Сооднос на компонентите

Табела 3.3. Карактеристики на смолниот систем

Табела 3.4. План – матрица на експериментот

Табела 3.5. Кодирање на варијаблите

Табела 4.1. Експериментална матрица со резултатите од трансверзалната јачина на копесија

Табела 4.2. Резултати од пресметката на дисперзијата

Табела 4.3. Вредности на коефициентите  $\beta_i$ .

## ЛИСТА НА СЛИКИ

Слика 2.1. Шематска презентација на процес на намотување на филамент

Слика 2.2. Кружно намотување

Слика 2.3. Спирално намотување

Слика 2.4. Поларно намотување

Слика 2.5. Машина за намотување на филаменти оптимизирана со CADWIND софтвер

Слика 2.6. Варијации на аголот на намотување

Слика 2.7. Геометриска претстава на дизајнот на експериментот

Слика 2.8. Редослед на тестовите според дизајнот на експериментот

Слика 2.9. Интеракција меѓу три фактори

Слика 3.1. (а) Када за импрегнирање, (б) произведени примероци

Слика 3.2.(а) Тубуларен примерок; (б) Пробна опрема со примерок за испитување на копресија

Слика 3.3. Скенирачки електронски микроскоп Tescan

Слика 3.4. Напречен прекин на примероците со агол на намотување а)  $90^{\circ}$  и б)  $10^{\circ}$

Слика 4.1. Напрегање – деформација криви на композитни цевчести примероци (со агол на намотување  $10^{\circ}$ ) добиени од универзалната машина за тестирање

Слика 4.2. Напрегање – деформација криви на композитни цевчести примероци (со агол на намотување  $90^{\circ}$ ) добиени од универзалната машина за тестирање

Слика 4.3. Тестирање на композитни прстен примероци со агол на намотување на влакната  $10^{\circ}$  и  $90^{\circ}$

Слика 4.4. Приказ на деструктурирани примероци со различен агол на намотување после испитувањето на јачина на копресија

Слика 4.5. Механички својства на композитните цевки во однос на аголот на намотување