



Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје

Машински факултет



МАГИСТЕРСКА РАБОТА

**ПРИМЕНА НА ШЕСТ СИГМА МЕТОДОЛОГИЈА И ДИЗАЈН НА
ЕКСПЕРИМЕНТИ ЗА ПОДОБРУВАЊЕ НА ИНДУСТРИСКИ ПРОЦЕС
ЗА ДОБИВАЊЕ НА КОМПОЗИТНИ ЦЕВКИ**

Ментор:

Проф. Д-р Атанас Кочов

Кандидат:

Сара Сребренкоска, дипл. инж. техн.

Скопје, 2016 год.

Ментор:

Д-р Атанас Кочов, ред. проф.
Машински факултет – Скопје

Членови на комисија:

Д-р Роберт Миновски, ред. проф.
Машински факултет – Скопје

Д-р Бојан Д Јованоски, доцент
Машински факултет – Скопје

Датум на одбрана: 02. 12. 2016г.

Магистерски труд на Машински факултет

Искрена благодарност:

- На мојот ментор ***Проф. Д-р Атанас Кочов***, за искрената помош при насочувањето во изработката на овој магистерски труд како и за целосната ангажираност и соработка во текот на целокупното студирање на постдипломските студии на насоката *Индустриско инженерство и менаџмент*.
- На ***Проф. Д-р Роберт Миноски***, за укажаната помош во текот на формулирањето и изработката на трудот како и за покажаниот интерес и стручни совети во текот на студирањето.
- На ***Доц. Д-р Бојан Д Јованоски***, за покажаниот интерес и соработка за изработка на трудот.
- На стручниот тим од ***Институтот за современи композити и роботика од Прилеп***, кои ми ја овозможија реализацијата на експерименталниот дел од овој труд како и за укажаната можност за постојана соработка.
- На сите оние кои на било каков начин ми помогнаа.

АПСТРАКТ

Во рамките на оваа магистерска работа беше применета шест сигма DMAIC методологија за подобрување на процесот за производство на композитни цевки. Беа дефинирани барањата за квалитет за композитните цевки: отпорност на висок внатрешен притисок и беа определени битните влезови кои влијаат на подобреното решение. За подобрување на индустрискиот процес беше направено дизајнирање т.е. планирање на експериментите и врз основа на план матрицата беа 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 лабораториски тестирана јачината на истегнување. Врз основа на добиените експериментални податоци беше добиена регресиона равенка која најдобро го опишува процесот. Од регресионата равенка беше заклучено дека процесниот параметар: аголот на намотување има најголемо влијание на јачината на композитните цевки. Имено, поголемиот агол на намотување доведува до поголема јачини на истегнување кај композитните цевки.

Во рамките на оваа магистерска работа беше применет и софтверскиот пакет Hoffman Engineering и беше направена анализа на шест типови композитни цевки. Од сите анализи беше заклучено дека отпорноста на висок внатрешен притисок на композитните цевки многу зависи од аголот на намотување на влакната и од типот на применетите влакна. Композитните цевки врз основа на јаглеродни влакна имаат најмала маса, а највисока отпорност на внатрешен притисок споредено со композитни цевки врз основа на стаклени влакна и врз основа на хибиден материјал.

Беше направена и споредба на композитните цевки со конвенционалните метални цевки од прохром при што беше заклучено дека композитните цевки се поотпорни на високи внатрешни притисоци, а притоа полесни и со многу пониска цена.

Композитните цевки се добра замена за конвенционалните метални цевки од прохром во однос на квалитет и цена на чинење и може успешно да се применуваат во голем број индустрии за транспорт на флуиди, за резервоари и цистерни за хемикалии и гориво.

Клучни зборови: шест сигма, дизајн на експерименти, план матрица, намотување на влакна, композитни цевки, јачина на истегнување.

ABSTRACT

Within the frames of this thesis it was applied the six-sigma DMAIC methodology for improving the production process of composite pipes. The quality needs of the composite pipes were defined: resistance on high interior pressure and the important entries that influence on the improved solution. A designing was made for improving of the industrial process, i.e. planning of the experiments and on the basis of the plan matrix, 8 models of composite pipes were manufactured. During the process of designing three parameters were taken which influence the experiments the most: velocity, fiber tension and winding angle. Also, it was used three-factorial method for experimental planning with two levels of variation 2^3 . For all manufactured composite pipes the hoop tensile strength was tested in a lab. On the basis of the received experimental data it was created the regression equation which the best describes the process. From the regression equation it was concluded that the winding angle, as a process parameter, has the greatest influence on the strength of the composite pipes. Namely, the bigger angle leads to a greater hoop tensile strength of the composite pipes.

Also in this thesis it was applied the software package Hoffman Engineering and an analysis was made on six types of composite pipes. From all analyses it was concluded that the higher interior pressure resistance of the composite pipes highly depends on the winding angle of the fibers and the type of the applied fibers. The composite pipes with carbon fibers have the smallest weight and the greatest resistance on interior pressure in comparison with the composite pipes with glass fibers or a hybrid material.

In addition, it was made a comparison of the composite pipes with the conventional metal pipes. It was deduced that the composite pipes are more resistant on high interior pressures and they are lighter in weight and cheaper in price.

The composite pipes are good replacement for the conventional metal pipes in terms of quality and price and they may be successfully applied in many industries for fluid transport, for reservoirs and cisterns for chemicals and fuel.

Key words: six sigma, experimental design, plan matrix, fiber winding, composite pipes, tensile strength

СОДРЖИНА

		Стр.
Глава 1: Вовед		
1.	Вовед	11
1.1	Структура на магистерската работа	15
Глава 2: Шест сигма методологија		
2.	Шест сигма методологија	18
2.1.	Вовед	18
2.2.	Историја на шест сигма	19
2.3.	Придобивки на шест сигма	20
2.4.	Примена на шест сигма	21
2.5.	Шест сигма DAMIC методологија	24
2.6.	Фактори за успешна имплементација на шест сигма	27
2.7.	Предности и ограничувања на шест сигма методологијата	30
Глава 3: Дизајн на експерименти		
3.	Дизајн на експерименти	31
3.1.	Кратка историја на експериментирањето	31
3.2.	Стратегија на експериментирањето	32
3.2.1.	Стратегија на најдобро гаѓање	34
3.2.2.	Стратегија на еден по еден фактор	35
3.2.3.	Факторна стратегија	35
3.3.	Основни принципи на експериментирањето	36
3.3.1.	Рандомизација	36
3.3.2.	Репликација	37
3.3.3.	Блокирање	37
3.4.	Процедура за дизајнирање на експерименти	37
3.5.	Факторен дизајн на експерименти	41
Глава 4: Теоретски основи на индустриски процес за производство на композитни цевки		
4.	Теоретски основи на индустриски процес за производство на композитни цевки	42
4.1.	Композитни материјали	42
4.2.	Структурни елементи кај композитните материјали	43

4.2.1.	Зајакнувачки материјал кај композитните материјали	44
4.2.2.	Матрици	45
4.3.	Индустриски процес за намотување на влакна	49
4.4.	Техничко технолошка и економска анализа на процесот	50
4.5.	Критериуми за анализа на оправданоста за производство на композитни цевки	53
Глава 5: Предложен модел за работа		
5.	Предложен модел за работа	55
Глава 6: Практичен дел		
6.	Практичен дел	59
6.1.	Материјали користени за експериментите	59
6.2.	Производство на композитни цевки	61
6.3.	Дизајнирање на експериментите	62
6.4.	Определување на јачина на истегнување на композитни прстени	64
6.5.	Техничко технолошка и економска анализа на различни типови композитни цевки споредбено со конвенционалните цевки за иста намена	67
Глава 7: Анализа на резултатите		
7.	Анализа на резултатите	76
7.1.	Определување на регресиона равенка т.е. равенката за модел од прв ред со три фактори	76
7.2.	Проверка на моделот односно адекватноста на регресионата равенка	82
7.3.	Одредување на моделот во инженерски единици	85
7.4.	Добиени резултати од техничко технолошката и економската анализа на различни типови композитни цевки	86
7.5.	Примена на композитни цевки	99
Глава 8: Заклучок		
8.	Заклучок	103
9.		
9.	Користена литература	106
10.	Прилози	108

Листа на слики

- Слика 2.1. Графички приказ на нормален распоред (или крива-свонче)
- Слика 2.2. Излезни податоци на два процеса
- Слика 2.3. Распределба на кривите за двата процеса
- Слика 2.4. Шематски приказ на фазата *мерење*
- Слика 3.1. Генерален модел за систем или процес
- Слика 3.2. Процедура за дизајнирање на експерименти
- Слика 3.3. Дво-факторен експеримент со одзивот (y) прикажан во кошевите
- Слика 3.4. Дво-факторен експеримент без интеракција
- Слика 3.5. Дво-факторен експеримент со интеракција
- Слика 4. 1. Шематски приказ на технологијата на намотување на влакна
- Слика 4.2. а) Намотување под одреден агол; б) Радијално намотување
- Слика 4.3. Блок дијаграм на процесот на намотување на влакна
- Слика 5.1. Шематски приказ на шест сигма DMAIC моделот за подобрување на процес за производство на композитни цевки
- Слика 6.1. а) Намотување на влакна во лабораторијата на Институтот за современи композити и роботика, б) изглед на композитни цевки
- Слика 6.2. Производство на композитни цевки со различен агол на намотување на влакна
- Слика 6.3. Прстен примерок и алат заедно со прстенот за тестирање
- Слика 6.4. Попречна површина со која се одредува крајното напрегање на истегнување
- Слика 6.5. Универзална машина за тестирање
- Слика 6.6. Софтверска апликација *Hoffman Engineering* - креирање на слоеви на различни шест типови композитни цевки
- Слика 6.7. Софтверска апликација *Hoffman Engineering* - дефинирање на параметри за анализа
- Слика 7.1. Приказ на деструктурирани примероци со различен агол на намотување после испитувањето на јачина на истегнување: а) примерок со најмала јачина на истегнување и агол на намотување 10^0 , б) примерок со најголема јачина на истегнување и агол на намотување 90^0
- Слика 7.2. Резултати од пресметката и анализата на разни типови композитни цевки
- Слика 7.3. Влијание на типот на материјалот и аголот на намотување врз внатрешниот притисок на композитните цевки

Слика 7.4. Цена на едно парче на композитна цевка (100x1000x3mm) за сите типови на композитни цевки

Слика 7.5. Маса на композитни цевки во однос на нивната издржливост на внатрешен притисок

Слика 7.6. Цена на композитни цевки во однос на нивната издржливост на внатрешен притисок

Слика 7.7. Отпорност на внатрешен притисок на разни типови метални и композитни цевки

Слика 7.8. Маса на разни типови метални и композитни цевки

Слика 7.9. Цена на разни типови на метални и композитни цевки

Слика 7.10. Намотување на резервоар за гас под притисок

Слика 7.11. Резервоар за гас под висок притисок (1-пластичен лајнер, 2-композит, 3-приклучок за вентил)

Слика 7.12. Примери на композитни лизгачки лежишта

Листа на табели

- Табела 2.1. Процент на дефекти, принос и DPMO во рамките на сигма
- Табела 4. 1. Карактеристики на најчесто користени синтетички влакна
- Табела 5.1. План матрица на експериментот
- Табела 6.1. Карактеристиките на компонентите на смолниот систем
- Табела 6.2. Сооднос на компонентите
- Табела 6.3. Карактеристики на смолниот систем
- Табела 6.4. План матрица на експериментот
- Табела 6.5. Димензии на тест примероците
- Табела 6.6. Основни податоци за анализираните цевки
- Табела 6.7. Минимален притисок на разрушување и однос на напрегање за цевки
- Табела 6.8. Структура на композитен сид за шест типови композитни цевки
- Табела 7. 1. Резултати за јачина на истегнување на примероци - композитни прстени
- Табела 7.2. Резултати од пресметките на дисперзијата
- Табела 7.3. Резултати од пресметките на вредностите на коефициентите, \square_i
- Табела 7.4. Резултати добиени од експериментот \bar{y}_j и од моделот y_j
- Табела 7.5. Резултати од пресметан внатрешен притисок на издржливост на шест типови композитни цевки
- Табела 7.6. Цена на чинење на единица парче – композитна цевка
- Табела 7.7. Внатрешен притисок на метални цевки

1. ВОБЕД

Решавањето на мноштво проблеми во индустриското инженерство и унапредувањето или подобрувањето на истите, често е поврзано со изведување на сложени и скапоцени експерименти. Оттука е разбирливо значењето од постоењето на методологии за подобрување на процесите кои содржат различни начини и методи за оптимално планирање на експериментите, кои во низа случаи овозможуваат суштествено да се скрати времето и материјалните трошоците при извршување на истражувањето. Долго време редоследот на извршување на експериментите бил базиран на личното искуство и интуиција на истражувачот.

Процесот на континуирано подобрување бара тим од експерти кои заедно со раководството на компанијата ќе применат активно користење на методологии и алатки во нивните активности за подобрување на индустрискиот процес. На располагање постојат голем број на методологии и алатки за подобрување на процесите, но изборот на најсоодветен не е секогаш лесна задача. Алатките се од суштинско значење за процесот и многу е важно да се знае како, кога и кои алатки треба да се користи во решавање на проблемот или подобрување на процесите.

Шест сигма е пристап на ниво на организација и се користи за да се определи точно како менаџерскиот тим треба да ги постави и постигне целите. Тоа покажува колку подобрувањата се значајни за да може да се постигнат посакувани резултати [1]. Шест сигма методологијата вклучува употреба на податоци, статистичка анализа и дизајнирање на експерименти. Постојат две клучни методологии за вршење на шест сигма проекти. Овие методологии се составена од пет фази, и имаат соодветни акроними DMAIC и DMADV. Првата методологија е добро дефинирана и се користи најдобро ако организацијата е насочена кон подобрување на постојните производи, процеси или услуги. Оваа методологија е наречена DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*) или дефинирање, мерење, анализирање, подобрување и контрола. Другата методологија е наречена DMADV (*Define, Measure, Analyze, Design, Verify*) или дефинирање, мерење, анализирање, дизајнирање и потврдување и се применува кога треба да се развие нов производ, процес или услуга. Целта на шест сигма DMAIC

методологијата е да помогне да се осознае кој влезови или фактори имаат значајно влијание врз излезот, а потоа да се оптимизираат и да се контролираат тие влезови или фактори, така што ќе се добие саканиот резултат.

Дизајнот на експерименти (Design of experiments - DOE) е многу важен елемент во шест сигма DMAIC методологијата. Дизајнот на експерименти дава структуриран статистички пристап кој помага да се разбере кои фактори влијаат на процесот, а потоа врз основа на тие сознанија се создаваат значајни и ефективни тестови за верифицирање на можностите за подобрување на процесите, производите, услугите, идеите или теориите.

Производствениот процес на композитните материјали секогаш може да се разгледува дека е составен од повеќе фази. Индустрискиот процес за производство на композитни цевки претставува интеграција од три категории на производни чекори кои генерално го опфаќаат целокупниот производен процес:

- процесни чекори поврзани со припремата на материјалите и суровините, како и директното производство со постапката на намотување на влакна и полимеризација на матрицата на композитот,
- производни чекори поврзани со контрола на квалитетот и карактеристиките на производот во подделни меѓу фазни операции но и завршното тестирање пред испорака,
- фазите на транспорт на материјалите, суровините и меѓу производот и на крај готовиот производ.

Производството на композитни цевки е од големо значење бидејќи се однесува на стандардни типови на композитни цевки кои се во директна конкуренција со постарите типови, како што се челичните цевки. Индустриската важност на процесот е голема затоа што добиените композитни цевки 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 на високи притисоци.

Најчесто подобрувањата на процесите за производство на композитни материјали кои пред се имаат технолошко технички и економски ефект, се гледа во порационалното искористување на суровините и помошните материјали, а со тоа и отпадоците и штетните материи кои како резултат на процесот контролирано или неконтролирано се исфрлаат или пак плански се одлагаат во околината. Доколку процесите за производство на композити се повеќе компактни и фазите на производството се поврзани со ефикасност во искористување на опремата, временскиот циклус по единица производот е пократок. Од тоа може да се заклучи

дека во оптимизираните односно подобрените/унапредените процеси за производство на композитни материјали, цената на потрошената енергија по единица производ е помала.

Развојот на многу методи, кои го овозможуваат нашиот современ начин на живеење, е тесно поврзан со развојот и достапноста на одредени материјали. 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. Развојот на материјалите е особено изразен во последните 100 години. Така, развојот на некој карактеристичен материјал е претходник на развојот на соодветна технологија. Од илјадниците материјали што ни стојат на располагање, понекогаш е проблем да се направи вистински избор на вистинскиот материјал. Но 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, а кои се 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 пример, какво е однесувањето на материјалот во корозивни средини и при високи температури. Последен, но не помалку важен критериум е цената на чинење на производот. Така, може да се најде материјал кој ќе има одлични својства, но сепак, да не биде премногу скап. Во секој случај, потребно е да се направи компромис со цел да се најде оптимално решение за дадени потреби [1, 2].

Денес, својствата на материјалите, во голема мера се познати и документирани во прирачници (на пример, ASM Materials Handbook) кои се дигитално сочувани.

Компјутерскиот дизајн претставува стандарден дел од обуката на денешниот инженер кој ги има на располагање широко достапните пакети за моделирање, оптимизација и селекција на материјалите и на процесите. Софтверскиот пакет за селекција на материјалите и на процесите се потпира на базата на податоци за атрибутите на материјалите и на процесите, нивната меѓусебна компатибилност што овозможува пребарување и селекција на оние материјали и процеси кои најдобро ги исполнуваат барањата за соодветен дизајн.

Првите обиди да се применат математички методи за дизајнирање на експериментите биле од страна на англискиот математичар Роналд Фишер (Roland A. Fisher) во почетокот на XX век. Теоријата за планирање на експериментите особено брзо почнала да се развива по 1951 година, а е поврзана со работата на Џорџ Бокс (George Box) и Кенет Вилсон (Kenneth Geddes Wilson). Методите на оптимално дизајнирање на експериментите овозможуваат користење на математички методи не

само за обработка на резултатите од тестовите туку и во фазата на подготовката и спроведувањето на експериментите. Работата на истражувачите кои ги користат тие методи значително се олеснува затоа што се изведува по логично дефинирана редоследна постапка [2, 3].

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

а. Дизајнирање на експериментите заради изучување на механизмите на сложените процеси и својствата на повеќе-компонентните системи.

б. Дизајнирање на експериментите заради оптимизација односно подобрување на технолошките процеси и својствата на повеќе-компонентните системи [4].

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. Дизајнот на експериментот е тесно поврзан со проучувањето на процесот или системот за кој го изведуваме експериментот т.е. со стекнување сознанија за нив.

Индустриските процеси за производство на композитни материјали се во континуиран развој со постојана тенденција за воведување на нови процеси и технолошки решенија во истите. Процесот на намотување на влакна и добивање на композитни цевки е релативно нов процес кој претставува предизвик за индустриските капацитети кои работат со композитни материјали. Изборот на постапките и условите на процесирање за добивање на композитен материјал се од особена важност, бидејќи во голем степен влијаат на својствата на добиениот материјал и цената на крајниот производ. Затоа, особен научен, но и практичен предизвик претставуваат истражувањата за процесите за добивање на композитни материјали, оптимизацијата или подобрувањата на параметрите на процесот како и нивната карактеризација.

Производството на композитни структури најчесто е поврзано со добивање на производи кој имаат непостојан квалитет. Тоа е типично за вакви типови материјали што произлегува од нивната анизотропна природа. Инженерите кои работат со процеси за добивање на вакви материјали имаат слобода да ги дизајнираат процесите за добивање на композитни структури во зависност од крајните барањата за исполнување на одредени својства. Композитните цевки најчесто се применуваат како добра замена за корозивните челични и метални цевки за масло, гас и вода, а исто така и како резервоари и затоа барањата кои треба да ги исполнат се поврзани со нивната трајност

и издржливост на високи внатрешни притисоци. Добивањето на композитни цевки кои ќе имаат не променлив (постојан) квалитет, мала тежина, а истовремено ќе бидат трајни и издржливи на висок притисок и конкурентни со цена на пазарот поттикна различни активности во таа областа.

Оттука произлезе и мотивот и определбата за оваа магистерска тема.

Во рамките на оваа магистерска работа ќе биде применета шест сигма DMAIC методологија за подобрување на процесот за производство на композитни цевки.

Основната цел на истражувањето ќе биде преку дизајнирање на експериментите т.е. примена на факторен експериментален дизајн да се добијат максимален број на податоци со минимален број на експерименти за процесот и да се направи оптимизациона анализа за да се добие краен производ кој ќе има одлични својства, но сепак, да не биде премногу скап. За реализација на предвидената цел ќе биде направена анализа на индустрискиот процес врз основа на што ќе се утврдат параметрите кои најмногу влијаат на процесот и истите ќе бидат земени во дизајнирањето на експериментите и во анализата на цената и перформансите. Преку примена на шест сигма методологијата и дизајнот на експерименти треба да се добие подобро односно оптимално решение за производство на композитни цевки кои ќе бидат издржливи на висок внатрешен притисок. Исто така, ќе биде дадена техничко технолошка и економска анализа на композитните цевки споредено со конвенционалните метални и челични цевки за иста намена.

1.1. Структура на магистерската работа

Магистерската работа структурирана е во осум глави односно покрај воведот (*Глава 1*), содржи уште седум примарни делови (глави).

Во *Глава 2* од трудот – **Шест сигма методологија**, се дадени основни информации за шест сигма методологијата со едена кратка историја за примената на истата. Потоа, се презентирани придобивките од примена на оваа методологија како и начинот на нејзина имплементација. Посебен е објаснета шест сигма DMAIC методологијата.

Во *Глава 3* од трудот - **Дизајн и анализа на експерименти**, дадена е кратка историја на експериментирањето, стратегија и основни принципи на експериментирање. Потоа, презентирана е процедурата за дизајнирање на

експерименти. Изборот на дизајн, вклучува размислување за избор на прелиминарен емпириски модел за толкување на резултатите. Моделот всушност претставува квантитативна поврзаност (равенка) меѓу одзивот и значајните дизајн фактори. Презентирани се најчесто користените математички модели од прв и од втор ред. На крај е дадено објаснување за факторниот експериментален дизајн.

Во *Глава 4* од трудот – **Теоретски основи на индустриски процес – производство на композитни цевки**, теоретски е опишан индустрискиот процес за производство на композитни материјали и се истакнат факторите кои најмногу влијаат на процесот. Исто така, во оваа глава ќе има подглавје во кое теоретски е опишано што се тоа композитни материјали и типовите на конституенти кои ги сочинуваат.

Во *Глава 5* од трудот – **Предложен модел за работа**, направен е предлог модел кој најдобро го опишува процесот. Имено, преку примена на шест сигма DMAIC методологијата, беа дефинирани, анализирани и мерени сите влезови и проблеми на индустрискиот процес за производство на композитни цевки, а врз основа на тоа со користење на дизајн на експерименти или поконкретно факторен експериментален дизајн, направен е предлог на модел за работа кој ќе одговори на поставената цел – подобрување на процесот.

Во *Глава 6* од трудот – **Практичен дел**, прво се презентирани конститутивните материјали кои беа користени за производството на композитни цевки. Потоа, беа избрани факторите кои најмногу влијаат на процесот како и минималната и максималната граница на нивно варирање. Врз основа на тоа, беше направена план матрица на експериментите по која што се направија потребните експерименти. Исто така, се презентирани и критериумите кои се користат за техничко технолошка и економска анализа на композитните цевки како и користениот софтверски програм за таа цел.

Во *Глава 7* од трудот – **Анализа на резултатите**, беше определена регресионата равенка т.е. равенка за модел од прв ред со три фактори кој најдобро го опишува процесот и беше направена анализа на влијанието на факторите врз процесот како и анализа на излезот т.е. одзивот на функцијата. Исто така, беше направена и проверка на моделот т.е. адекватност на р-нката. Дополнително, беше направена техничко технолошка и економска анализа на различни композитни цевки во реални услови и истите беа споредувани со конвенционални метални и челични цевки за иста намена. Во оваа глава беше анализирана и примената на композитните цевки од аспект на цена/перформанси.

Во *Глава 8* од трудот – **Заклучок**, дадени се завршни констатации во врска со применетата шест сигма методологија и добиениот модел од прв ред со три фактори за подобрување на индустрискиот процес – производство на композитни цевки. Исто така, дадени се заклучоци и за цената и перформансите на разни типови композитни цевки како и за оправданоста од нивно производство и континуирано подобрување на процесите за нивно добивање.

2. ШЕСТ СИГМА МЕТОДОЛОГИЈА

2.1. Вовед

Шест Сигма претставува збир на техники и алатки за подобрување на процесите. Таа била воведена од страна на инженерот Bill Smith додека работел во Motorola во 1986 година. Подоцна, во 1995 година за инженерот Jack Welch воведувањето на шест сигма било од централно значење во неговата бизнис стратегија во General Electric. Денес, шест сигма се користи во многу индустриски сектори [1].

Шест Сигма има за цел да се подобри квалитетот на процесот на производство со идентификување и отстранување на причините за дефектите и минимизирање на варијабилност во областа на производството и бизнис процесите. Таа користи збир на методи за управување со квалитет, главно емпириски, статистички методи, и создава посебна инфраструктура на луѓе во рамките на организацијата, кои се експерти во овие методи. Примената на шест сигма методологијата во рамките на една организација има определен редослед на чекори и има специфични цели, како на пример: намалување на времето на циклусот на процесот, намалување на загадувањето, намалување на трошоците, зголемување на задоволството на клиентите, зголемување на профитот и слично [1, 5].

Шест сигма методологијата може да се дефинира како систематска примена на деловни и статистички концепти и техники, со цел намалување на варијациите на процесите и нивно подобрување. Таа претставува структуриран пристап кон решавање на проблемите и вклучува дефинирана методологија со специфични алатки. *Шест сигма* претставува и техника и филозофија, базирана на желбата да се отстрани дефектот, и да се подобрат перформансите технички колку што е можно повеќе. Овој пристап (принцип) во себе ги содржи следниве три елементи:

- *мерка*: статистичка дефиниција за тоа колку процесот отстапува од совршенството,
- *цел*: 3,4 дефекти на милион можности,
- *филозофија*: долгорочна бизнис стратегија, фокусирана на редуцирање на трошоците преку редуција на варијабилноста на производите и процесите, фокусирана на подобрување или унапредување на процесите.

Терминот шест сигма потекнува од терминологија поврзана со статистичко моделирање на процеси на производство. Тоа е статистички концепт кој ја претставува промената т.е. варијацијата која постои во процесот и тоа во однос на барањата на купувачите. Шест сигма може да се сретне во литература со следните ознаки: **6σ**, **6 Сигма**, или **6s**. Процесите каде е применета шест сигма методологијата имаат мала варијација, а тоа значи дека 99,99966% од output-от/излезот од процесите е без дефекти (3,4 неисправни карактеристики/дефекти на милион можности). Motorola поставила цел и успеала да ја постигне со примена на шест сигма методологија за сите свои производни операции. Потоа, шест сигма методологијата прераснала како практика во многу индустриски сектори за управување и инженеринг во постигнување на одредена цел.

Шест сигма методологијата е дизајнирана за употреба во различни типови на производство. Сите процеси во организацијата не се со еднаква важност, па затоа би било нелогично да се применува *шест сигма* методологија во секој од нив. Фокусот на *шест сигма* методологијата треба да биде насочен кон најкритичните области. Критичноста на процесите треба да биде водена од потребите и барањата на потрошувачите [1, 6, 7].

2.2. Историја на шест сигма

Почетоците на овој концепт се од средината на 80-тите години на минатиот век, кога америчката фирма за електроника Motorola, се обидела да направи еден голем исчекор во врска со прашањето за намалување на дефектите и компанијата го создала концептот под име „zero defect”. Согласно на тоа, Motorola континуирано работела на испитување на потребите на своите купувачи, на анализирање на своите производните процеси и на процесите на своите добавувачи. Тоа и овозможило на Моторола да стани еден од препознатливи брендови на светскиот пазар. Motorola, станала темелно успешна во својата употреба на *шест сигма*. Бидејќи и други организации го анализирале и следеле нејзиното работење, Motorola, решила дополнително да ја прошири својата стратегија. Motorola, *шест сигма* ја дефинира како програма за унапредување на квалитетот, со цел намалување на дефектите на 3-4 делови на милион. Во првите десет години од употребата на *шест сигма*, Motorola, тврди дека заштедела преку 400 милијарди долари. Во 1988 година ја добила наградата за квалитет Malcolm Baldrige National Quality Award, за пионерските напори во користењето на *шест сигма*

концептот. Набрзо и **General Electric** и **Allied Signal** почнале да го применуваат овој концепт [1, 8].

Проектите кои ги користат *шест сигма* принципите во контролата на квалитетот, најчесто го следат процесот на подобрување кој го сочинуваат пет фази под името: **DMAIC**, што претставува акроним од следниве зборови: *Define* (дефинирање), *Measure* (мерење), *Analyze* (анализирање), *Improve* (подобрување), *Control* (контрола) [6-8].

Фирмите кои го користеле шест сигма концептот добиле многу предности, а овде се наведени некои од нив: како што се следните:

- **Motorola**, (1987-1994): намалено ниво на дефекти во текот на процесот на производство за фактор 200, намалени производни трошоци за 1,4 милијарди долари, четири пати зголемена вредноста на учество на акционерите.

- **Allied Signal** (1992-1996): намалено време за претставување на нови производи за 16%, намалени трошоци за производство за повеќе од 1 милијарда долари.

- **General Electric** (1995-1998): заштеди во склоп на целата фирма од милијарда долари.

- **Honeywell** (после нејзиното спојување со **Allied Signal**) (1999-2001): пријавени случаи во поглед на сигурноста и тоа намалени за 43%, а изгубените работни денови намалени за 50% во однос на претходната година.

До крајот на 1990-тите години шест сигма методологијата ја користеле 2/3 од компаниите и тоа во насока на намалување на трошоците и подобрување на квалитетот. Денес шест сигма методологијата се користи многу пошироко: во болниците, затворите, единиците на локалната самоуправа, банките, производството, итн. Во последните години шест Сигма е често во комбинација со Лин (LEAN) производство и таа методологија е наречена лин шест сигма методологија (Lean Six Sigma).

Зборот LEAN потекнува од англискиот јазик, и истиот термилошки се користи во организацијата и менаџментот, а може да се преведе како нешто што означува тенко или слабо. Со поимот LEAN може да се означи „витка“ фабрика која ги минимизира загубите во текот на производството. LEAN производството претставува група на методи и техники, кои имаат за цел во најголема можна мера да ги намалат загубите кои настануваат во текот на производството [1, 6].

2.3. Придобивки од шест сигма

Шест сигма е методологија за подобрување на ефикасноста и ефективноста на било што правиме:

- Шест сигма помага во намалување (или целосно елиминирање) на непотребното, и додава вредност на активностите во процесот, значи – намалување на потребното време и трошењето на ресурси.

- Шест сигма помага да се подобри квалитетот на производите и услугите со користење на специјален сет на алатки и методи за откривање, докажување и елиминирање на причините за варијација на квалитетот. Овој двоен пристап дава континуирано подобрување и гради основа за успешен управувачки систем и деловен раст во иднина.

Шест сигма методологијата е во насока на: намалување на грешка, елиминирање на варијација во процесите што доведува до грешки, дизајн и подобрување на процеси, мерење на ефикасноста и статистичка анализа.

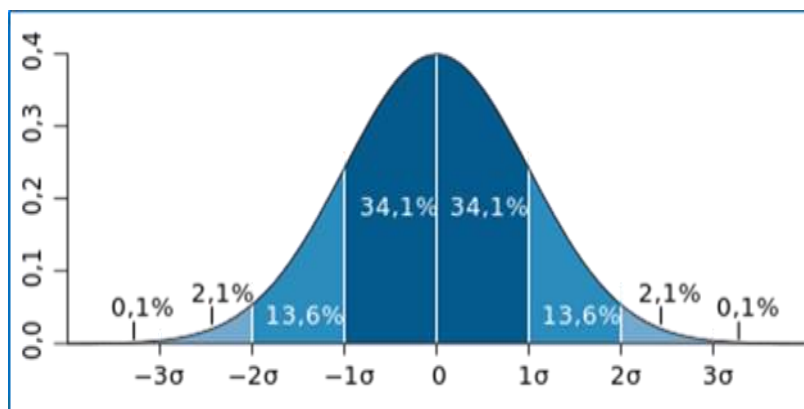
Со примена на шест сигма методологијата може да се постигне:

- подобрување на квалитетот,
- намалување на оперативните трошоци,
- намалување на грешките,
- подобро искористување на времето,
- подобрување на квалитетот, клиент/вработен,
- подобрена конкурентна предност.

2.4. Примена на шест сигма методологија

Она што процесот го прави кандидат за да се примени шест сигма методологијата е следното: прво мора да постои проблем со квалитетот или отстапување помеѓу тековниот и саканиот резултат. Второ, процесот кој се разгледува не би требало да има разбирлив проблем и трето решението не смее да биде однапред утврдено, а оптималното решение не смее да биде очигледно. Кога ќе се избере процесот и ќе се утврди целта следат бројните методи и техники за управување со квалитетот. *Шест сигма* проектите се типови на проекти, кои се фокусираат на давање на поддршка на *шест сигма* филозофијата, преку фокусирање кон корисниците и елиминирање на загубите, зголемување на нивото на квалитет и подобрување на финансискиот резултат до неверојатно ниво. Како што е спомнато и претходно, со *шест сигма* концептот треба да се постигне подобрување на квалитетот преку намалување на варијациите. Поимот *сигма* означува стандардна девијација која покажува каква варијација постои во дистрибуцијата на податоците. Доколку е помала тоа значи дека помеѓу податоците постои помала варијабилност и обратно. На слика 2.1 прикажана е нормална

распределба на кривата во облик на своно, која е симетрична во однос на аритметичката средина односно просечната вредност на анализираниите податоци.



Слика 2.1. Графички приказ на нормален распоред (или крива-свонче)

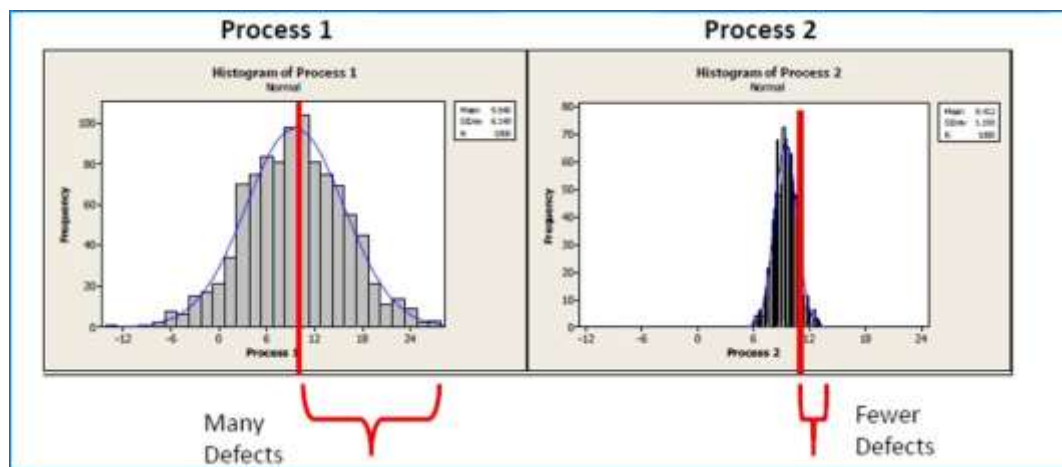
На слика 2.2, прикажан е пример за излезот (output) на два процеси чија што цел е постигнување на излезна вредност помала од 10. Двата процеси имаа средна вредност 9,4 односно помала од 10 меѓутоа, процесите не се добро реализирани бидејќи има многу варијацијата на излезните податоци што генерира намалување на квалитетот, а поради тоа корисниците нема да бидат задоволни.

Process 1	Process 2
20	9
5	11
17	8
5	10
15	10
5	9
5	11
5	10
5	8
12	8

	Process 1	Process 2
Average	9.4	9.4
Minimum	5	8
Maximum	20	11
Median	5	9.5
Standard deviation	6.0	1.17

Слика 2.2. Излезни податоци на два процеса

Распределбата на кривите за двата процеса во однос на анализираниите податоци е дадена на слика 2.3 од каде што може да се види дека процесот 1 е помалку способен за задоволување на барањата на корисниците во споредба со процесот 2.



Слика 2.3. Распределба на кривите за двата процеса

Шест сигма методологијата се заснова на обезбедување на квалитет на производите и услугите со цел да бидат обезбедени/задоволени барањата на корисниците. При тоа Y - претставува одзивна функција т.е. мерење на одзивот (output) т.е. излезот на процесот, додека X - претставуваат влезови или варијабли кои влијаат на Y . Дефект претставува неуспехот да се испорача она што се очекува на корисникот. DPMO (Defects per million opportunities) претставуваат дефектите на милион можности. Варијацијата го претставува предвидениот излез и задоволството на клиентите. Сигма - претставува израз на приносот на процесот врз основа на бројот на дефекти на милиони можности (DPMO).

Стандардната девијација претставува најбитниот фактор за утврдување на прифатливиот број на дефекти. Во табела 2.1. прикажан е процентот на дефекти и излез во рамките на сигма и бројот на дефекти во милион можности (DPMO).

Шест сигма претставува таков вид на унапредување на работењето на едно претпријатие кое се базира на наоѓање на грешки и нивното елиминирање, наоѓање на причините на грешките и на нивното елиминирање, во сите процеси на создавањето и испорачување на производите/услугите на крајните корисници [6-8].

Табела 2.1. Процент на дефекти, принос и DPMO во рамките на сигма

Сигма	Дефекти	Излез	DPMO
1	69,1%	30,9%	691462
2	30,8%	69,1%	308538
3	6,7%	93,3%	66807
4	0,62%	99,38%	6210
5	0,02%	99,977%	233
6	0,0003%	99,9997%	3,4

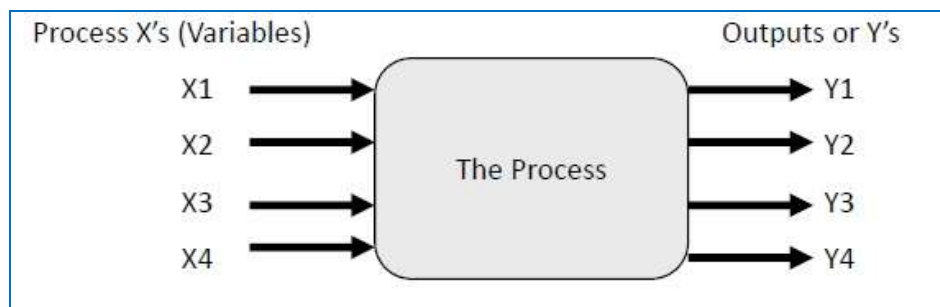
2.5. Шест сигма DMAIC методологија

Постојат неколку методологии за имплементација на шест сигма филозофијата во претпријатието. Овие методологии се составена од пет фази, и имаат соодветни акроними DMAIC и DMADV. Првата методологија е добро дефинирана и се користи најдобро ако организацијата е насочена кон подобрување на постојните производи, процеси или услуги. Оваа методологија е наречена DMAIC или дефинирање, мерење, анализирање, подобрување и контрола. Другата методологија е наречена DMADV или дефинирање, мерење, анализирање, дизајнирање и потврдување и се применува кога треба да се развие нов производ, процес или услуга. Најзастапен методологија за примена во подобрување на некој процес, производ или услуга е DMAIC циклусот. **DMAIC** претставува систематски затворен процес за континуирани подобрувања, научно поткрепен и заснован на факти. Се состои од пет фази:

Define (дефинирање): опфаќа дефинирање на проблемот и определување на целите, дефинирање на процесот и корисничките барања, утврдување и идентификација на проблемите кои треба да се елиминираат. Битните влезови кои се користат во оваа фаза влијаат на идејното решение на проектите, се во описот на корисничките барања, се во шемата на процесот и во податоците за мислењата и потребите на крајните корисници (жалби, анкети, коментари и истражување на пазарот).

Measure (мерење) – го опфаќа мерењето на тековната состојба во претпријатието. Целта на овој чекор е да се направи објективна проценка на моменталната состојба на процесот што треба да претставува основа за негово подобрување. Оваа фаза опфаќа: избор на карактеристики за квалитет на производот/услугата, дефинирање на стандарди за изведба, собирање на податоци и анализа на системот за мерење. Ова

претставува чекор на собирање на податоци, чија цел е да се воспостават основи за ефикасност на процесот. Перформансите од оваа фаза на мерење ќе се споредуваат со перформансите по завршување на процесот за да се утврди објективно дали е постигнат значителен напредок. Тимот одлучува за она што треба да се мери и како да се измери. Вообичаено за тимовите е да се инвестира многу напор во оценувањето на соодветноста на предложените системи за мерење. Добрите податоци се многу значајни и се во центарот на процесот DMAIC.



Слика 2.4. Шематски приказ на фазата мерење

Analyze (анализирање) – претставува анализа на причините за проблемите во претпријатието, детална проверка на процесот со цел изнаоѓање на решенија за унапредување односно подобрување. Тимот кој работи на *шест сигма* проектот, кој се нарекува и *шест сигма тим*, ги истражува и потврдува податоците, како би докажал дека одредена појава е навистина причината за проблемите со квалитетот. Оваа фаза опфаќа: воспоставување на тековната способност/капацитет, идентификување на клучните извори/причини на варијабилноста и дефинирање на перформансите на целите. Значајна алатки за оваа фаза претставуваат графиците, статистичките анализи, дизајнот на експерименти и слично.

Improve (подобрување) – претставува генерирање на решенија и идеи за решавање на проблемот или поточно претставува подобрување или унапредување со помош на воведување на решенија кои ќе го елиминираат проблемите. Конечното решение го верификува инвеститорот на проектот, а потоа *шест сигма* тимот развива план за пилот тестирање на решенијата. Тимот ги разгледува резултатите од тестот и по потреба ги прилагодува решенијата, а потоа го имплементира решението на потребното место. Оваа фаза опфаќа: оптимизација на Y (одзивната/излезната функција), потврда за подобрување, спроведување и план за контрола. Целта на овој чекор е да се идентификува, тестира и имплементира решението за поставената цел/проблем,

делумно или во целина. Во оваа фаза се идентификуваат креативни решенија за отстранување на клучните основни причини за процесните недостатоци и за подобрување на процесот. За некои процеси може да се користат сложени анализа односно алатки како што е дизајнот на експерименти DOE (Design of Experiments).

Целта на фазата *подобрување* во шест сигма DMAIC методологијата е да помогне да се осознае кој влезови или фактори имаат значајно влијание врз излезот, а потоа да се оптимизираат и да се контролираат тие влезови или фактори, така што ќе се добие саканиот резултат. Дизајнот на експерименти (Design of experiments - DOE) е многу важен елемент во шест сигма DMAIC методологијата. Дизајнот на експерименти дава структуриран статистички пристап кој помага да се разбере кои фактори влијаат на процесот, а потоа врз основа на тие сознанија се создаваат значајни и ефективни тестови за верифицирање на можностите за подобрување на процесите, производите, услугите, идеите или теориите.

Control (контрола) – претставува контрола и мониторинг на резултатите односно следење и верификување на стабилноста на подобрувањата и предвидливоста на решенијата. Оваа фаза опфаќа: определување на капацитетот/способноста на новиот процес, спроведување на контролни процеси, потврдување дека подобрувањата се одржливи.

Голем број на автори, издвојуваат три области на овој концепт. Првата област е филозофија и визија на системот. Главниот мото е „извонредност во се што работиме“. Прифаќање на било кои понизок критериум од максималниот, се оценува како недостаток на амбициозноста.

Втората област е системот на мерење. Основната задача е да со помош на различни алатки да се ги измерат перформансите на процесите во компанијата.

Третата област е методологија – систематичност на собирање на податоците, одредување, мерење и стандардизација.

За да шест сигма успее во одредена компанија, мораме да се развие современ менаџмент во нашата компанија. Исто така, мораме да се има во предвид фактот да овој концепт е ориентиран кон менаџерите на највисоко ниво, бидејќи без нивното ангажирање овој концепт не може да заживее во одредена компанија. Предност на воведување на оваа филозофија е зголемување на профитот и рентабилност на компанијата како последица на намалување на непотребните трошоци. Но, од друга страна примена или воведување на овој концепт не се состои само во елиминирање на непотребните трошоци и дефектите во процесите, туку подразбира и континуирано следење на потребите на корисниците. Но, тоа не е доволно. Компаниите можат да

очекуваат успех и профит во иднината, само доколку ги задоволат потребите на корисниците на иновативен начин. Поточно, компанијата мора континуирано да го усовршува својот производниот процес [1, 5].

2.6. Фактори за успешна имплементација на шест сигма

Мерката на совршенството на било кој процес е неговата дисперзија. Процесите се реализираат на различни начини, според технолошките шеми, а на нив влијаат: човекот, материјалите, машините, методите, внатрешните и надворешните фактори. Ако недозволените отстапувања се идентификуваат порано, се смалуваат трошоците за дополнителна обработка и доработка на дефектните производи. Кога дефектите ќе го поминат целиот циклус на производство, се дополнуваат со нови дефекти, така да, можноста на доработка, морално губење на клиентите и несигурност во производот, растат со геометриска прогресија. Сето ова спаѓа во цената на низок квалитет. Затоа, една од задачите во претпријатијата е борба со отстапувањата на процесот и задржување на отстапувањата во минимални граници со примена на 6 сигма методологијата.

Акцентот на 6 сигма пристапот не е толку на бројот на дефекти на милион можности колку на примена на методологијата за систематско и системско снижување на дисперзијата на процесот.

Концепцијата 6 сигма е концепција на постојано унапредување и е тесно поврзана со финансиското работење на претпријатијата. Денес, за постојано унапредување или подобрување најчесто се користи циклусот DMAIC

Услов за успешно реализирање на програмата 6 сигма е постоење современ менаџмент, посебно јако лидерство. Лидерството вклучува иницијатива од врвот, приврзаност кон пристапот бсигма со активно учество во него, согласност на сите вработени, продор на мислења, проактивен стил на работа, тимска работа, обука, поддршка за успешните акции и достигнувањата.

Низ *утврдувањето на проблемите* се дефинира целта и рамката на проектот, а тоа е преку идентификација на проблемот кој треба да се реши на патот кон достигнување на зададеното ниво на отстапување. Целите може да бидат различни на различни нивоа во компанијата. Така на пример, на ниво на врвното раковоство, цел може да бидат отстапувањата во инвестиции или ангажирање на голем дел од профитот. На оперативно ниво, цел може да биде зголемување на обемот на производство на било кој погон. На тактичко ниво, цел може да биде намалување на бројот на застои или

зголемување на ефикасноста на процесот. За идентификување на потенцијалните можности на подобрување се користат собраните податоци. Мерењето се врши со примена на адекватни методи и техники и се обезбедува собирање податоци и информации за тековната состојба. Врз основа на податоците и информациите, се оценува базното ниво на показателите на работата и се селектираат проблемите кои бараат посебно внимание. Низ анализата се идентификуваат основните (главни) причинители на проблемите за обезбедување квалитет (со проверка на податоците, со примена на специјални методи и техники за анализа на податоците и др). На крај се прави контрола односно оценка и мониторинг на резултатите од претходните фази. Во оваа етапа се верификува модификацијата на системот и се создаваат нови правила, процедури, инструкции на вработените и други норми на работење.

Секоја од наведените етапи бара примена на специјални, аналитички и математички методи од големиот избор на методи.

Друг битен момент во реализацијата на шест сигма методологијата е распределбата на улогите на специјалистите. За секој чекор се именуваат реализатори, со следните улоги:

- **Лидер** (Champion) - член на топ менаџментот на компанијата кој има обврска да ги прифати предложените решенија од проектот 6 сигма и да обезбеди негова реализација. Лидерот има задача да создаде клима и услови, како и да ги обезбеди потребните ресурси.

- **Црн појас** (Black Belt) - се доделува на вработен кој во склад со неговото знаење е специјалист од висока класа, односно експерт од областа на 6 сигма. Тој го подготвува проектниот тим, раководи и изведува обука и носи целосна одговорност за потполно исполнување на програмата за стекнување потребни квалификации во тимот.

- **Проектната група** за остварување на програмата 6 сигма е составена од вработени кои го реализираат проектот 6 сигма. Тоа се специјалисти од одредени области во рамките на проектот 6 сигма, кои ја поминале обуката и се голема поддршка во текот на реализација на проектот и работат во склад со своите знаења.

Предуслов за успешно реализирање на програмата 6 сигма претставува примена на современ менаџмент, а посебно активно учество на топ менаџментот. За успешност во примената е неопходна иницијатива од врвот, приврзаност кон пристапот 6 сигма со активно учество во него, согласност на сите вработени, продор на мислења, проактивен стил на работа, тимска работа, обука, поддршка за успешни акции и достигнувања. Методологијата на 6 сигма излегува од рамката на чист статистички пристап на делување бидејќи бара одредено социјално и културно ниво на средината (навики и

менталитет на вработените), инфраструктура и развој на корпоративната култура во компанијата. Основни фактори за успех во реализацијата на методологијата на 6 сигма се:

- целосна поддршка од топ менаџментот,
- потполно ангажирање на лидерот на тимот за 6 сигма,
- интеграција на оваа методологија со стратегијата и целите на топ менаџментот, односно компанијата,
- дефинирање на рамките на деловните процеси,
- изградената мрежа на купувачи и пазарот,
- реалните заштеди, приходите и профитот на компанијата,
- мотивацијата и поттикот за сите вработени,
- инфраструктурата на методологијата,
- корпоративната култура и др.

За да ефектите од 6 сигма се чувствуваат во компаниите е потребно:

- континуирано стремење кон совршенство, посебно стремеж на топ менаџментот,
- обука на раководството и соработниците со базните аспекти на 6 сигма методологијата,
- исполнување и опишување на сите процеси, од почеток до крај, со формирање карта каква е ситуацијата преку анализа на процесот, се со цел да се идентификуваат непотребните активности, а посебно активностите кои не доведуваат до резултати (испекции и проверки и др.),
- формирање карта на процесот како тој треба да биде во услови на совршеност со редизајн на деловните процеси,
- анализа на трошоците на квалитет предизвикани од дефекти или грешки за секој чекор на процесот,
- категоризација и составување Парето дијаграм за основните дефекти,
- анализа на клучните причинители на дефектите, воведување решенија за нивно отклонување,
- стандардизација на решението,
- повторно опишување на процедурата за идентификација на нивото по бројот на дефектите.

2.7. Предности и ограничувања на 6 сигма методологијата

Најголема предност од примената на оваа методологија е зголемување на рентабилноста и профитот, на сметка на намалување на директните трошоци, а при тоа се зголемува и задоволството на купувачите / корисниците. Со намалување на бројот на дефекти и со обезбедување на пократок производен циклус, расте продуктивноста.

Методологијата на 6 сигма ја пратат и ограничувања.

Влезната цел на 6 сигма не е само намалување на бројот на дефекти, туку идентификација и усовршување на т.н. клучни карактеристики на квалитетот (Critical to Quality -CTQ). Тоа се карактеристики кои ги одредуваат сите очекувања од овој или оној производ или услуга. Само со правилно одредување на сите тие карактеристики и нивно унапредување преку примената на методологијата на 6 сигма, се обезбедува потполно задоволствена купувачите/корисниците. И сето тоа е недоволно. Компаниите може да сметаат на успех во иднина само ако им понудат на своите купувачи / корисници иновации. За компанијата е неопходно непрекинато да ја усовршува својата дејност. Зголемената примена на методологијата на 6 сигма во правец на посветеност кон стабилност на процесот, исполнување на утврдените правила, е спротивно од потребата на иновации и идеи. Иноваторскиот пристап во секоја компанија доведува до отстапувања во производниот процес, пореметувања, необични решенија, недоволна обученост - сè против што се бори 6 сигма методологијата.

3. ДИЗАЈН НА ЕКСПЕРИМЕНТИ

3.1. Кратка историја на експериментирањето

Најголемиот придонес на теоријата и практиката за статистичкото донесување заклучоци во XX век е во дизајнирањето на експерименти. Постојат четири ери во современиот развој на статистичкото планирање на експериментите. *Агрикултурната ера* е одбележана со работата Роланд Фишер (Roland A. Fisher) во текот на неговата почетна работа во земјоделскиот институт: Rothmasted Experimental Station во близината на Лондон во 1920-тите и раните 1930-ти години, каде работел на статистика и анализа на податоците. Фишер го проучувал приносот во земјоделството во зависност од видот и количината на ѓубриво, климата и врнежите. Забележал дека грешките кои се прават во експериментите кои генерирале податоци често оневозможуваат анализа на податоците од системот. Соработувајќи со научници и истражувачи од многу полиња, развива гледиште кое доведува до трите основни принципи на планираниот експеримент: рандомизација, репликација и блокирање [9].

Втората или *индустриската ера* е карактеристична од развојот на методологијата за одзивната површина од страна на Џорџ Бокс (George Box) и неговите соработници во 1951. Тој сфатил и го искористил фактот дека многу индустриски експерименти фундаментално се разликуваат од тие во земјоделството од два аспекти: (1) одзивната варијабла е видлива (скоро) одма, и (2) експериментаторот многу брзо може да ги добие клучните информации од мала група на изведени експерименти кои можат да се искористат за планирање на следниот експеримент. Во следните 30 години техниката на одзивната површина и други експериментални техники се прошируваат во хемиската и други процесни индустрии, главно во истражувачка и развојна работа. Меѓутоа, примената на статистичкиот дизајн на ниво на погон или произведен процес се уште не била доволно раширена. Во текот на оваа втора или индустриска ера Кифер (Kiefer, 1959, 1961) предлага формален пристап на селектирање на дизајн кој е специфичен за целта на експериментирањето, а со цел да се постигне оптималност. Овој пристап не наоѓа некоја голема примена заради недостаток на компјутерски алатки за негова имплементација [3, 4, 10].

Третата ера на статистичкиот дизајн е одбележана со работата на Геничи Тагучи (Genichi Taguchi) во касните 1970-ти години. Неговата работа има огромно влијание врз проширувањето на интересот за планираните експерименти. Тагучи е поборник на користење планирани експерименти, како што вели, за робустен дизајн. Тоа значи:

- Правење на процесот да биде неосетлив на факторите од амбиентот (околината) или од други фактори кои тешко се контролираат.
- Правење производите да бидат неосетливи на варијациите пренесени од компонентите.
- Наоѓање на нивоа на процесните варијабли кои ја доведуваат средната вредност на саканото ниво а истовремено редуцирајќи ја варијабилноста околу тоа ниво.

Тагучи предлага високо-фракционарани факторни дизајни и воведува нови статистички методи. Како резултат на работата од Тагучи произлегуваат неколку позитивни последици. Прво, примената на планираните на експеримент многу се раширува и во дискретните делови од индустријата како што е: автомобилската, авио, електрониката, индустријата за полупроводници, и многу други, кои претходно воопшто не ја користеле оваа техника. Второ, *четвртата ера* на статистичкиот дизајн на експерименти почнува. Оваа ера се карактеризира со побуден голем интерес за статистички дизајн и од страна на истражувачите и од страна на производителите и со развој на многу нови корисни пристапи кон експерименталните проблеми. Новите пристапи се алтернативи на Тагучи-евите технички методи што овозможуваат неговиот инженерски концепт да биде спроведен во пракса ефикасно и ефективно, пред се, во функција на подобрување на квалитетот. Трето, има огромно подобрување во компјутерскиот софтвер за дизајн на експерименти со многу нови карактеристики и способности. Успешното интегрирање на добриот експериментален дизајн во инженерството и науката е клучен фактор во идната индустриска конкурентност [11].

3.2. Стратегија на експериментирањето

Посматрањето на некој систем или процес кога е во функција е важен дел од процесот на стекнување знаења и е интегрален дел на учењето и разбирањето како системите и процесите функционираат. Меѓутоа, за да се сфати што се случува со процесот ако се променат некои влезни (input) фактори не е доволно само да се посматра – потребно е да се менуваат факторите. Ова значи дека за навистина да се разбере релацијата *причина-и-последица* на некој систем, мора намерно да се менуваат влезните варијабли во системот и да се посматраат промените на излезот (output) од системот кои што тие варијабли

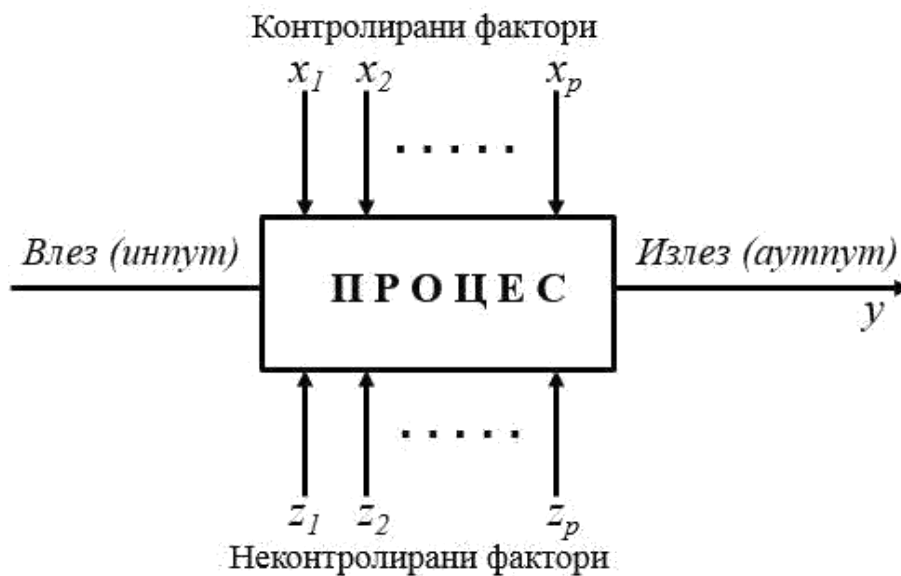
ги предизвикуваат. Со други зборови, потребно е да се извршат експерименти врз системот. Посматрањето на системот или процесот води кон теории и хипотези за тоа што го прави системот да функционира, но за да се покаже дали тие теории се точни, потребни се експерименти [10-12].

Истражувачите вршат експерименти, во сите полиња од интерес, особено за да откријат нешто посебно за даден систем или процес. Секој изведен експеримент е всушност тест. Или формално, можеме да го дефинираме експериментот како тест или серија на тестови кај кои намерно вршиме промени на влезните варијабли од процесот или системот за да можеме да ги посматраме и идентификуваме промените кои настануваат на излезот или одзивот на системот.

Експериментирањето игра голема улога во технологијата, комерцијализацијата и во активностите за реализирање на нови продукти. Тоа опфаќа дизајн на новиот продукт, развој на произведен процес и подобрување на процесот. Целта, во многу случаи, е да се развие робустен процес т.е. процес чија променливост минимално зависи од надворешните услови. Исто така постои голема примена на планираните експерименти во непроизводни гранки, како што се маркетингот, услужните дејности, информатиката и општите бизнис активности [13].

Експериментирањето е витален дел од научните или инженерските методи. Има низа на ситуации каде научниот феномен е толку познат што можат да се развијат математички модели од (добро) познатите принципи. Моделите на вакви феномени кои произлегуваат директно од физичкиот механизам обично се нарекуваат **механички модели**. Прост пример за ова е познатиот Омов закон кој ги поврзува отпорот, јакоста и напонот на струјата, $U = RI$. Меѓутоа, повеќето проблеми во науката и инженерството бараат посматрање на системот во функција и експериментирање за да се разјасни зошто и како тој функционира. Добро дизајнираните експерименти можат често да водат кон модел за перформансите на системот. Вака експериментално определени модели се нарекуваат **емпириски модели**. Овие емпириски модели можат да бидат манипулирани од страна на научниците или инженерите исто како што можат да бидат и механичките модели [9, 14].

Доброто дизајнираниот (планираниот) експеримент е важен заради фактот што резултатите и заклучоците што ќе се изведат врз негова база, во голем дел, зависат од начинот на кој тие податоци се добиени.



Слика 3.1. Генерален модел за систем или процес

Генерално, експериментите се користат за проучување на перформансите на процесите или системите. Процесите или системите можат да бидат претставени со модел прикажан на сликата 3.1. Обично го замислуваме процесот како комбинација на операции, машини, методи, луѓе и други елементи кои трансформира некаков input (често материјал) во output кој има една или повеќе видливи одзивни варијабли. Некои од процесните варијабли и особини на материјалите x_1, x_2, \dots, x_p се контролибилни, додека други z_1, z_2, \dots, z_q се неконтролибилни.

Експериментите често вклучуваат неколку фактори. Обично, цел на експериментаторот е да го утврди влијанието што го имаат факторите врз одзивот на системот. Општиот пристап кон планирањето и изведувањето на експериментите се нарекува стратегија на експериментирањето. Еден експериментатор може да употреби неколку стратегии [15]. Некои од тие стратегиите се следниве:

- Стратегија на најдобро гаѓање,
- Стратегија на еден-по-еден-фактор,
- Факторна стратегија.

3.2.1. Стратегија на најдобро нагаѓање

Оваа стратегија на експериментирање е врз основа на пристапот *проба-и-грешка*. Често во пракса ја користат научниците и инженерите. Експериментаторите што ја користат оваа стратегија имаат големо техничко и теоретско познавање за системот

што го проучуваат како и добро практично искуство. Користејќи го своето знаење експериментаторите избираат т.е. нагаѓаат кој е најдобриот сет на фактори за даден процес/систем. Врз база на резултатите од еден тест со менување на еден/повеќе фактори се прави следниот, па следниот, и така може да се експериментира до бесконечност. Оваа стратегија има, најмалку, два недостатоци. *Прво*, ако првиот тест не дава задоволителни резултати, експериментаторот треба да направи друго нагаѓање со променето ниво на факторите. Ова може да трае долго време без било каква гаранција за успех. *Второ*, ако првото нагаѓање дава прифатлив резултат. Во ваков случај експериментаторот го прекинува тестирањето иако нема гаранција дека го нашол најдоброто решение.

3.2.2. Стратегија на еден-по-еден-фактор (one-factor-at-a-time или OFAT)

OFAT пристапот се состои од избор на стартна точка или базна линија на нивото на секој од факторите, и потоа сукцесивно се менува нивото на секој фактор во рамките на неговиот опсег, додека останатите фактори се држат константни на ниво од базната линија. По изведувањето на сите тестови, најчесто, се конструираат серија на графици кои покажуваат како варијаблата на одзивот се менува со промената на секој фактор поединечно додека другите фактори се држат константни. Главен недостаток на овој пристап е што не ја зема во обзир интеракцијата. *Интеракцијата* претставува ефект кој се манифестира со тоа што еден фактор не врши еднакво влијание врз одзивот при различно ниво на друг фактор. Интеракцијата меѓу факторите е многу честа. И доколку ја има, стратегијата на еден- по-еден-фактор ќе продуцира лоши резултати. OFAT експериментите многу често се изведуваат во пракса. Еден-по-еден-фактор експериментите секогаш се помалку ефикасни од останатите методи базирани на статистички пристап кон планирањето на експериментите.

3.2.3. Факторна стратегија

Правилен пристап за справување со неколку фактори е да се изведува факторен експеримент. Ова е експериментална стратегија кај која факторите се менуваат *заедно*, место еден по еден.

Експерименталниот дизајн е критички важна алатка во научната и инженериската дејност за подобрување на процесот за реализација на краен производ. Критичните компоненти на овие активности се состојат во: нов дизајн на производниот процес и

развојот, како и менаџирањето на процесот. Примената на експерименталниот дизајн во создавањето на производи резултира во производи кои се полесни за производство и имаат зголемени функционални перформанси, помали производни трошоци и пократко време за дизајнирање како и време за развој. Дизајнираните експерименти, исто така, имаат екстензивна примена во маркетингот, истражувањето на пазарот, трансакционите и сервисните активности и генералните деловни операции.

3.3. Основни принципи на експериментирање

За еден експеримент најефективно да се изведи потребно е да се изведи на научна основа. Под *статистички дизајн на експерименти* се подразбира процес на планирање на експериментот така што соодветните податоци ќе бидат собрани и анализирани со статистички методи што ќе резултира во валидни и објективни заклучоци.

Статистичкиот пристап кон експерименталниот дизајн е неопходен ако сакаме да извлечеме разумни заклучоци од податоците. Ако проблемот вклучува податоци кои се подложни на експериментална грешка, статистичките методи се единствениот објективен пристап за анализа. Така, се јавуваат два аспекти на секој експериментален проблем: дизајн на експериментот и статистичка анализа на податоците. Овие два аспекти се тесно поврзани бидејќи методата на анализа директно зависи од применетиот дизајн.

Трите основни принципи на експерименталниот дизајн се: рандомизација, репликација и блокирање [9, 10,15].

3.3.1. Рандомизација

Рандомизацијата е фундаментална основа на која почнува примената на статистичките методи во експерименталниот дизајн. *Рандомизацијата значи, местото каде се наоѓа експерименталниот материјал и редоследот по кој се вршат индивидуалните тестови на експериментот случајно се одредуваат.*

Статистичките методи бараат опсервациите (или грешките) да бидат независно распределени случајни варијабли. Со рандомизацијата овој услов се исполнува. Со

адекватна рандомизација на експериментот овозможуваме доведување на екстерните фактори (кои можеби се присутни) на „просечна вредност“.

Компјутерските софтверски програми нашироко се користат при изведувањето на планираните експерименти. Овие програми често го презентираат изведувањето на опитите по случаен редослед.

3.3.2. Репликација

Под репликација подразбираме независно спроведен тест за секој комбинација на факторите. Репликацијата (повторувањето) има две важни особини. Прво му овозможува на експериментаторот да направи процена за експерименталната грешка. Оваа процена на грешката станува основна мерна единица за одредување дали приметените разлики во податоците се навистина *статистички* различни. Второ, ако сакаме да ја одредиме вистинската средна вредност на одзивот за едно ниво на факторите во експериментот, репликацијата му овозможува на експериментаторот да добие попрецизна процена на овој параметар.

3.3.3. Блокирање

Блокирањето е техника која се користи да се подобри прецизноста со која се прави споредба меѓу факторите. Често блокирањето се користи за да се елиминира или редуцира влијанието на непријатните фактори (*nuisance factor*). Непријатни се оние фактори кои можат да влијаат врз одзивот и за кои не сме директно заинтересирани. Генерално, под блок подразбираме сет на релативно хомогени експериментални услови. Ако експериментот се врши во повеќе работни смени, секоја смена ќе претставува посебен блок, итн. Потоа експериментаторот ги разделува опсервациите од статистичкиот дизајн во групи според тоа на кој блок му припаѓаат.

3.4. Процедура за дизајнирање на експерименти

За да се употреби статистичкиот пристап кон дизајнирање и анализа на некој експеримент, неопходно е сите што се инволвирани во експериментот да имаат однапред јасна претстава што треба да се проучува, како податоците ќе се собираат и барем квалитативно знаење за тоа како податоците ќе се анализираат [11]. На сликата 3.2 даден е концизен преглед на процедурата за дизајнирање на експерименти.



Слика 3.2. Процедура за дизајнирање на експерименти

Изборот на дизајн вклучува размислување за големината на примерокот (број на реплики), избор на погоден редослед на опитите за експерименталните проби, и утврдување дали има рестрикции за блокирањето или рандомизацијата.

Изборот на дизајн, исто така, вклучува размислување за избор на прелиминарен емпириски модел за толкување на резултатите. Моделот всушност претставува квантитативна поврзаност (равенка) меѓу одзивот и значајните дизајн фактори [12]. Во многу случаи полиномен модел од понизок ред се зема за соодветен. **Моделот од прв ред** со две варијабли е:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad (1-1)$$

каде y е одзивот, x -овите се факторите, со β е означен непознат параметар кој ќе биде одреден од податоците на експериментот и е експерименталната грешка на системот кој се проучува. Моделот од прв ред понекогаш се нарекува и модел на главните ефекти. Моделите од прв ред екстензивно се користат при скринингот или карактеризацијата на експериментот. Вообичаена екстензија на моделот од прв ред е додавањето на интерактивен член, т.е.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (1-2)$$

каде членот $x_1 x_2$ ја претставува интеракцијата на два фактори. Бидејќи интеракцијата на факторите е релативно честа, моделот од прв ред со интеракција многу широко се

користи. Интеракција од повисок ред исто така може да биде вклучена кај експериментите со повеќе од два фактори ако е неопходно. Друг широко користен модел е **моделот од втор ред**:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \varepsilon \quad (1-3)$$

Моделите од втор ред често се користат кај оптимизационите експерименти.

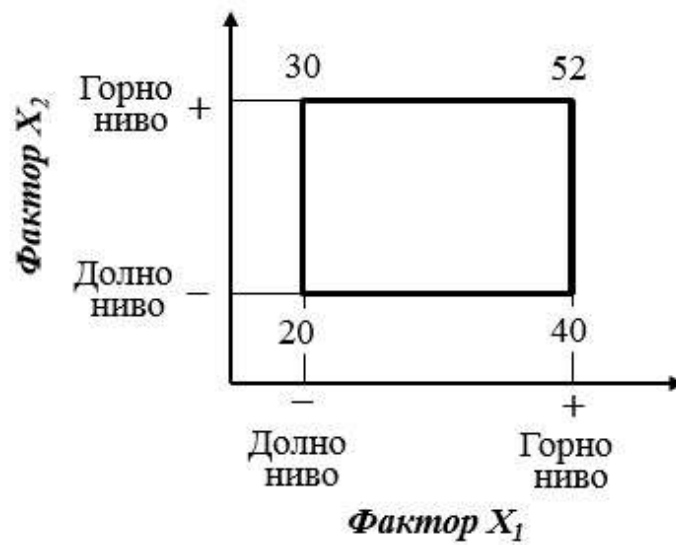
Статистички методи треба да се користат за анализа на податоците за да резултатите и заклучоците бидат објективни. Ако експериментот е добро дизајниран и изведен според планот, статистичките методи нема да биде тешко да се применат. Постојат многу одлични софтверски пакети наменети за анализа на податоци. Често пати едноставните графички методи играат значајна улога за анализа и интерпретација на податоците. Исто така, многу е корисно да се презентираат резултатите од многу експерименти во вид на емпириски модел т.е. во вид на равенка изведена од податоците која ја изразува поврзаноста меѓу одзивот и важните дизајн фактори. Треба да се има во предвид дека статистичките методи не можат да потврдат дали некој фактор (фактори) има одреден ефект. Тие само претставуваат водич за доверливоста и валидноста на резултатите [9, 11].

Штом податоците ќе бидат анализирани, експериментаторот треба да извлече *практични* заклучоци за резултатите и да препорача соодветна акција. Графичките методи се често корисни во оваа фаза, особено, за да им се презентираат резултатите на други лица. Следно, потребно е да се направат валидационо тестирање за да се валидираат заклучоците од експериментот.

3.5. Факторен дизајн на експерименти

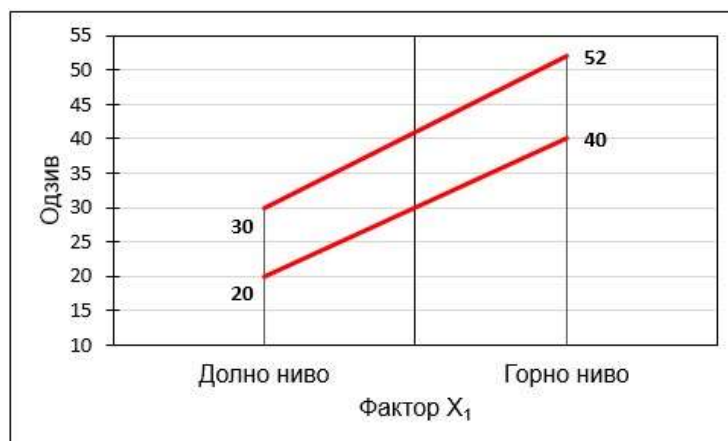
Многу експерименти вклучуваат проучување на ефектите на два или повеќе фактори. Во принцип, факторните дизајни се најефикасните од овој тип на експерименти. Под факторен дизајн подразбираме дека во еден комплетен експеримент сите можни комбинации на факторите се испитани. На пример, ако имаме *a* нивоа на факторот X_1 и *b* нивоа на факторот X_2 комплетниот експеримент ќе ги содржи сите *ab* комбинации. Кога факторите се подредени во факторниот дизајн често се вели дека се **вкрстени**. Ефектот на факторот го дефинираме како промена на одзивот предизвикана со промена на нивото на факторот. Ова често се нарекува **главен ефект** бидејќи се однесува на примарните фактори од интерес во експериментот [2, 10, 12]. На пример,

да разгледаме едноставен експеримент на сликата 3.3 што претставува дво-факторен експеримент кај кој двата фактори се на две нивоа. Овие нивоа се нарекуваат „**долно**“ и „**горно**“ и се означуваат со „-“ и „+“ соодветно. Во овој дво-факторен дизајн главниот ефект на факторот X_1 се посматра како разлика на средниот (просечниот) одзив на долното ниво од X_1 и средниот одзив на горното ниво од X_1 . Тоа важи и за факторот X_2 .

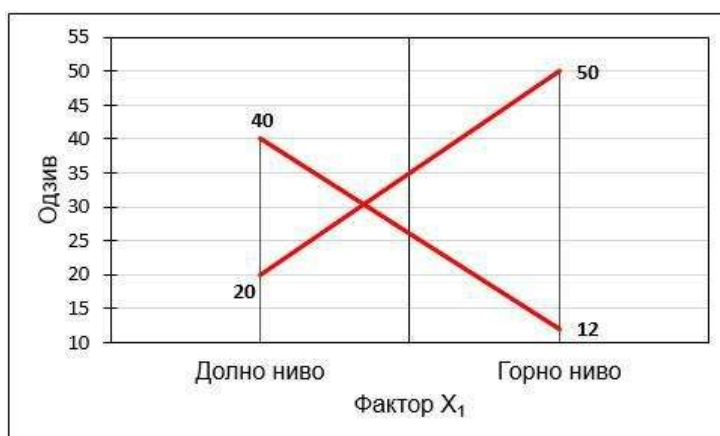


Слика 3.3. Дво-факторен експеримент со одзивот (y) прикажан во кошевите

Кај некои експерименти, може да се забележи дека разликата на одзивот меѓу нивото на еден фактор не е иста на сите нивоа од другиот фактор. Ако ова е случај тоа значи дека постои **интеракција** меѓу факторите. Ова може графички да се прикажи како на слика 3.4. Може да се забележи дека $-X_2$ и $+X_2$ линиите се скоро паралелни што индицира непостоење на интеракција меѓу факторите X_1 и X_2 . Слично, на сликата 3.5 се прикажани податоците од дво-факторен експеримент при што може да се забележи дека $-X_2$ и $+X_2$ линиите не се паралелни. Тоа е индикација за интеракција меѓу факторите X_1 и X_2 .



Слика 3.4. Дво-факторен експеримент без интеракција



Слика 3.5. Дво-факторен експеримент со интеракција

Постои и друг начин да се илустрира интеракцијата. Да претпоставиме дека двата горни фактори се квантитативни (температура, притисок, време, итн.). Тогаш тие можат да се презентираат преку регресивниот модел на дво-факторниот експеримент.

ГЛАВА 4: ТЕОРЕТСКИ ОСНОВИ НА ИНДУСТРИСКИ ПРОЦЕС ЗА ПРОИЗВОДСТВО НА КОМПОЗИТНИ ЦЕВКИ

4. ТЕОРЕТСКИ ОСНОВИ НА ИНДУСТРИСКИ ПРОЦЕС ЗА ПРОИЗВОДСТВО НА КОМПОЗИТНИ ЦЕВКИ

4.1. Композитни материјали

Во последните години расте интересот за нови современи композитни материјали поради потребата од материјали со необична комбинација на својства, кои не можат да бидат исполнети од страна на постоечките конвенционални материјали: метални легури, керамика и полимерни материјали. Во голем број индустрии потребни се структурни материјали коишто имаат ниска густина, голема јакост, тврдина, отпорност на абразија и отпорност на удар и коишто не кородираат. Таа комбинација на својства може да биде реализирана со композитните материјали. Тоа лежи во основата на филозофијата на композитните материјали кои претставуваат повеќефазен систем во кој постои значајна пропорција на својства на двете конститутивни фази, а притоа, самиот композит има супериорни својства во однос на одделните компоненти. Разните типови композити вклучуваат метални легури, керамика и полимери. Композитите се повеќефазни материјали во коишто составните фази се хемиски различни и одвоени со посебен интерфејс. Во дизајнирањето на композитните материјали, научниците и инженерите имаат можност со соодветна комбинација на различни метали, керамика и полимери да креираат нова генерација материјали со невообичаени својства. „Ако еден материјал не може целосно да ги исполни сите конструктивни барања, два или повеќе материјала можат“. Две основни барања се поставуваат при дизајнирањето на структурните компоненти од композитните материјали: 1. деформациите при оптоварувањето мора да бидат во рамките на пропишаните функционални барања и 2. композитната структура мора да биде отпорна на оштетување (кршење) во предвидениот период. За да биде тоа задоволено, потребни се информации за две важни механички карактеристики на композитниот материјал, а тоа се: крутоста и јакоста. Најголем дел од композитните материјали кои се развиени во последните години се произведени токму со цел да се подобрат нивните механички карактеристики - јакоста, крутоста, жилавоста, како и отпорноста на високи температури [16, 17].

Зборот композит (Composite) дословно значи „направен од неколку дела“. Композитниот материјал е систем составен од два или повеќе елементи, т.е. материјал кој содржи две или повеќе различни конституенти или фази. Оваа дефиниција важи само во случај кога конституентите имаат значително различни физички карактеристики и поради тоа композитните материјали имаат особини кои се различни од особините на конституентите. Попрецизната популарна дефиниција за композити подразбира само неметални материјали кои се состојат од влакнести зацврстувачи, како што се стакло, јаглерод или кевлар, инкапулирани во стврдната матрица на еден од неколкуте стотици полимерни системи. Овие композитни материјали се карактеризираат со нивните релативно високи односи јакост/тежина во споредба со традиционалните метални компоненти [18].

Значајно истражување, развој и напредок се остварени, исто така, и во сферата на композитните материјали со метална и со керамичка матрица (Metal Matrix and Ceramic Matrix Composites), но композитите со органска матрица (Organic Matrix Composites) имаат многу пораспространета примена.

Од широкото семејство на композити, композитите зајакнати со долги континуирани влакна имаат голема примена.

Постојат повеќе процеси за производство на овие композити. Но една од најприменуваните техники – индустриски процес е Filament Winding т.е. процес за намотување на влакна. Со помош на овој индустриски процес се добиваат зајакнати композити. Овие композити наоѓаат широк спектар на примена, а тоа се должи на нивните анизотропни својства и во нивната флексибилност во дизајнот. Овој процес овозможува намотување на различни долги и континуирани влакна под различен агол. Индустрискиот процес овозможува конструкторот дизајнерот на композит да игра со параметрите кои му ги дозволува оваа постапка со цел да добие најдобри карактеристики на ново формируваниот композит.

4.2. Структурни елементи кај композитните материјали

Композитите се материјали кои ги сочинуваат два основни елемента, од кои едниот се нарекува матрица (matrix) или основен материјал, која е континуирана фаза и која може да биде органска или неорганска, во која се додава другиот елемент, односно компонента, т.е. зајакнувач (reinforcement) (носечки материјал), кој често се нарекува диспергирана фаза, со цел постигнување на неопходната комбинација на својства

(цврстина, густина, крутост, тврдина, топлинска и електрична спроводливост). Важно е да се разбере дека за најголем дел композитни делови, зајакнувачот ја дава потребната јакост и крутост на композитниот материјал, а матрицата или врзивното средство е неопходно за поврзување, одржување позиција и ориентација на зајакнувачот и во пренесување на оптоварувањето меѓу зајакнувачите во сите насоки. Составните делови на композитот ги задржуваат своите индивидуални, физички и хемиски својства, но со заемна интеракција се добиваат композитни материјали, со карактеристики кои се супериорни во однос на конститuentите што ги сочинуваат. Својствата на композитите се функција на својствата на конститутивните фази, нивната релативна вредност и геометријата на дисперзираната фаза. Под „геометрија на дисперзирана фаза“ се подразбира обликот и големината на честичките, нивната дистрибуција и ориентација. Кај сите видови композитни материјали механизмот на зајакнување зависи од геометријата на зајакнувачот. Композитите зајакнати со континуирани влакна имаат најдобри механички особини. Тие не можат да се приспособат за масовно производство и се ограничени на производи каде што предностите во својствата ги оправдуваат трошоците [19, 20].

4.2.1. Зајакнувачки материјал кај комозитите

Има многу материјали кои можат да се користат како зајакнувачи, но во технологиите на современите композити доминираат: стаклените, јаглородните и арамидните влакна. Доколку е потребно за одредена апликација, како компонента може да се користи и хибрид на два или повеќе зајакнувачи.

Предностите на различни типови на влакна се претставени со следниве основни карактеристики:

- a. Glass - Стаклени влакна = Економичност
- b. Carbon - Јаглородни влакна = Крутост
- c. Aramid - Арамидни влакна = Отпорност на удар
- d. Boron = Висок модул на еластичност
- e. Silicon carbide = издржливост на висока температура

Првите три фамилии на зајакнувачки материјали се одликуваат со ниска густина и висока јачина. Стаклените влакна се ефикасни од аспект на однос јачина/тежина, и се многу економични. Јаглородните влакна имаат повисоки модули и јачини. Нивните специфични модули се повисоки од челикот, но се поскапи зајакнувачи. Кевларот како

органиско арамидно влакно, обезбедува добри својства на истегнување и одлична отпорност на удар.

Некои механичките карактеристики на најчесто користени континуирани влакна се дадени во табела 4. 1.

Табела 4. 1. Карактеристики на најчесто користени синтетички влакна

Вид на влакно	Густина, kg/m ³	Јакост на истегнување, МПа	Модул при истегнување, GPa	Издолжување до кинење, %	Апсорпција на влага, %
Синтетички влакна					
Стаклени - Е влакна	2,56	2000	76	2,6	0,1-0,4
Јаглородни	1,75	3400	230	3,4	0,04-0,1
Арамидни (Кевлар)	1,45	3000	130	2,3	0,3-0,8

4.2.2. Матрици кај композитите

Како матрици кои се користат кај композитите се:

- *Полимерни матрици*
- *Минерални матрици* - силикон карбид, карбон. Се користат за високи температури.
- *Метални матрици* - легури на алуминиум и титаниум и други.

Полимерните матрици за композитите се делат на термореактивни (thermosetting) и термопластични (thermoplastics).

Термопластичните полимерни матрици при загревање омекнуваат или се топат, а при ладење повторно се втврдуваат. Овој процес може да биде често повторуван, при што во полимерот не се случуваат никакви хемиски промени. Типични термопласти се полиамид - ПА, полипропилен - РР и ABS – акрилонитрил битадиен стирен. Освен овие, други познати термопластични полимерни матрици со дадени карактеристики во литература се [21]:

- ECTFE - ethylene- chlorotrifluoroethylene
- FEP - fluorinated ethylene propylene
- PBT- poly butylenes terephthalate
- PC - polycarbonate
- PE - polyethylene
- PEEK - poly ether ether keton

- PS - polystyrene
- PVC - polyvinyl chloride
- PPS - polyphenylene sulphone и.т.н.

Термореактивните полимери содржат молекули кои се вмрежени и при загревање не омекнуваат. Термореактивните полимерни матрици се формираат при реакција во која смолата и стврднувачот или смолата и катализаторот се мешаат и потоа трпат иреверзибилна хемиска реакција. По вмрежнувањето, кое најчесто се изведува на зголемени температури, тие стануваат крути, нетопливи и нерастворливи продукти. Кај некои термореактивни полимери, како што се фенолните смоли се создаваат испарливи супстанции како нус производ (кондензациона реакција).

Други термореактивни смоли како што се полиестрите и епоксидите се вмрежуваат без издвојување на испарливи супстанции и тие се многу полесни за процесирање (адисиони реакции). Еднаш вмрежените термореактивни полимери не можат да преминат повторно во течност при загревање, поради што над одредена температура нивните механички својства значително се менуваат. Оваа температура е позната како температура на стакленисување (Glass transition temperature - Tg). Таа варира за различни полимерни системи.

Матрицата е присутна обично со 30-40% во композитот и покрај основната функција - да ја обедини дисперзираната фаза и да го сочува обликот на композитот, таа исполнува различни други функции. Матрицата ја заштитува дисперзираната фаза од абразија и корозија под дејство на надворешни влијанија. Термичкото однесување на композитот главно зависи од термичката стабилност на матрицата. Најважното, матрицата го распределува применетото оптоварување и игра улога на пренесувач на напрегањето, па така кога индивидуалните зајакнувачи попуштаат, композитната структура не ја губи својата способност и натаму да издржува оптоварување. Меѓуслојната жилавост, јакоста на смолкнување, компресија и трансверзалната (попречна) јакост на композитот се, исто така, диктирани од матрицата. За да бидат исполнети сите овие функции, атхезијата меѓу зајакнувачката фаза и матрицата треба да биде што поголема. Кршењето (фрактурите) кај композитниот материјал е резултат на комбинираното однесување на зајакнувачот, матрицата и интерфејсот меѓу нив [16, 22].

4.3. Индустриски процес на намотување на влакна (Filament Winding Technology)

Технологијата на намотување е процес кој се користи за производство на композитни структури, како цевки за транспорт на флуиди и гасови, резервоари за течен нафтен гас, компримиран природен гас, електрични изолатори, столбови за светилки, ветерници и други производи [17].

Процесот на намотување на филаменти или влакна (filament winding technique) е една од најчесто применувана техника за добивање на полимерни композитни материјали. За производство на композитни материјали со оваа постапка се користи зајакнувачки материјал во форма на континуирани влакна (најчесто стаклени, јаглородни, арамидни) кои се натопуваат со полимерна термореактивна матрица во форма на течна смола (полиестерска, епоксидна и сл.) и се намотуваат на ротирачки мандрел. Оваа технологија се изведува на специјално дизајнирани машини, кои овозможуваат прецизна контрола на аглите на намотување при намотување на влакната. Структурите може да бидат обични цилиндри или цевки, со различни пречници и должини. Исто така можат да се намотуваат сферни, конусни и други форми [18, 23].

Основниот принцип се состои од повлекување на влакна преку систем за контрола на тензија на истите. Тие се шират со помош на чешли. Така раширени поминуваат низ када со смола (во случај на влажно намотување). На излез од кадата за смола, влакната се собираат во чешел и се формира ширината на снопот од влакна т.н. band. Вака споени влакната поминуваат преку око каде се дооформува снопот и со одредена ширина се намотуваат на површината на мандрелот. Влакната се движат и надолжно по должината на мандрелот. Мандрелот ротира со помош на мотор, кој го дава ротационото движење, и во комбинација со надолжното движење на снопот од влакна се прават групи (pattern) кои се шират по површината на мандрелот. Со покривање на површината на мандрелот во многу слоеви, се создава дебелина на сидот на делот. Ориентацијата на влакната може да се контролира со различни брзини на надолжното движење на влакната и ротационата брзина на мандрелот. Ориентацијата на влакната може да се контролира со различни брзини на надолжното движење на влакната и ротационата брзина на мандрелот. Тензијата на влакната е значајна за да се држат во одреден правец кога се намотуваат на површината на мандрелот [19].

Целиот процес на производство на композити со намотување се состои од следниве системи:

1. Единица за припрема на смолниот систем
2. Станица каде се одмотуваат влакната и се контролира тензијата
3. Када за импрегнација
4. Око и систем за транспорт на конците
5. Мандрел

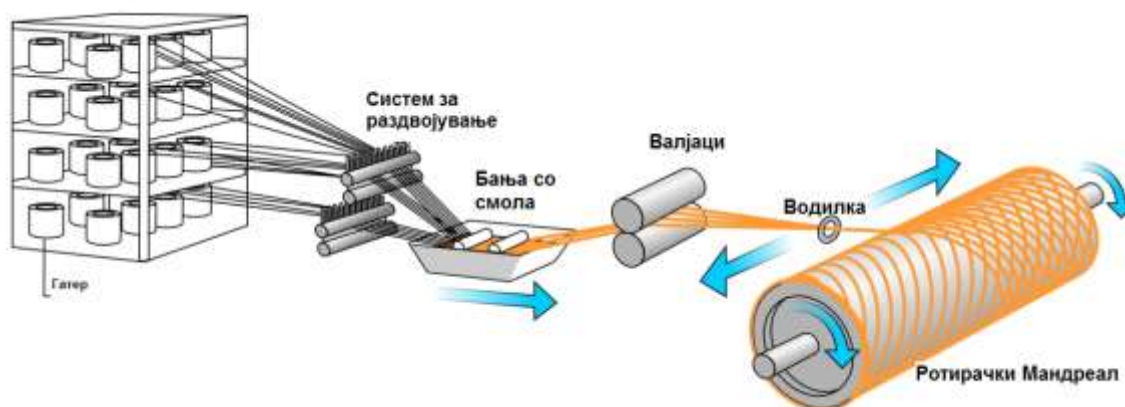
Оваа технологија на намотување на влакна шематски е претставена на слика 4. 1.

Системот за соединување на зајакнувачот со смолата се нарекува систем за импрегнација. Во процесот на намотување, главно се користат две постапки: сува и влажна [20].

Во *сувата постапка*, влакната директно се намотуваат и импрегнираат на површината на мандрелот. Оваа техника се нарекува импрегнирано намотување. Нејзината примена овозможува производителот да добие подобри механички својства на готовите производи. Поради високите материјални трошоци за импрегрирање, овој метод обично се користи за високо перформансни апликации.

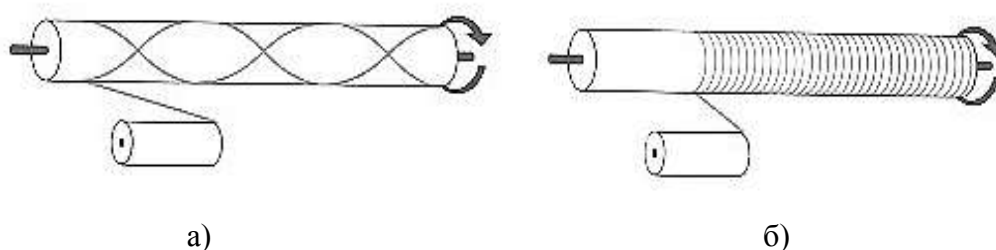
Во *влажниот метод* влакната поминуваат низ када со смола каде се врши импрегнација пред намотување. Квалитетот на импрегнација кај оваа постапка зависи од повеќе фактори како што се вискозноста на смолата, тензијата на влакната итн. Вискозноста на смолата има големо значење во овој процес. Ако таа е премногу висока, обложувањето на влакната со смола е нерамномерно. При ниска вискозност на смолниот систем, смолата може да тече надвор од делот за време на намотување, да предизвика релативно пониска процентуална тежина на смола во готовиот производ и неправилно импрегнирање. Тензијата исто така е значаен фактор за импрегнација во овој индустриски процес. Затоа треба да се контролира и да се знае при кои тензии имаме добра импрегнација односно наквасување на влакната со смола [21, 24].

Секој слој може да се разликува во тензија на намотување, агол на намотување, или содржина на смола т.е. масен удел на смола. Со варирање на аголот на намотување во однос на оската на мандрелот, може да се произведе готов производ што ќе ја издржи силата на оптоварување. Спирално намотување на слоеви со агол $\pm \theta$ е прикажано на слика 4.2. а), додека радијално намотување или намотување под агол многу близок до 90° е прикажано на слика 4.2. б), кое може да се користи во комбинација со спирално намотување [19, 22].



Слика 4. 1. Шематски приказ на технологијата на намотување на влакна

Други предности на оваа технологија се висока специфична сила, специфичен модул на влакната, волуменски процент на готовиот производ и висока повторливост на процесот. Производство може да се повтори сукцесивно, за да се добијат истите својства на готовите производи.



Слика 4.2. а) Намотување под одреден агол; б) Радијално намотување

Главно ограничување на технологијата на намотување е тешкотијата во производство на комплексни форми, заради барањето на сложен дизајн на мандрелот. Производство на делови со конкавни површини не е можно со користење на оваа техника [21].

За проценка на композитни структури добиени со намотување се користат тестови со т.н. прстени во Институтот за материјали, наука и применета механика. Прстенеста форма на примероци може да се примени за тестирање со аксијален притисок, внатрешен притисок и нивни комбинации. Јачината на истегнување на прстен примероци може да се утврди со тестирање со дводелен диск.

Со помош на дизајн на експериментите, може да се истражи комплексната интеракција во намотаниот производ со влакна и да се направи дизајн на променливи кои влијаат на јачината на истегнување и квалитетот на прстен примероците. Контролата на тензија е важен фактор за подобро намотување на моделите, што е главна причина за висока сила на истегнување.

Постојат повеќе параметри кои влијаат на кршење на влакната во текот на нивниот транспорт при процесот на намотување, што влијае на механичките својства на крајниот композит [20].

Тестови со дводелен диск се користат за одредување на јачина на истегнување на прстенот. Овие тестови имаат пониска цена од хидростатичките тестови и се ефикасни во одредување на перформансите на цевчести структури кои обично се користат под внатрешен притисок.

Во рамките на оваа магистерска работа се анализирани променливите параметри на процесот на намотување и конечните својства на прстен примероците, произведени со таа постапка.

4.4. Техничко технолошка и економска анализа на процесот

Од технолошки аспект производствениот процес на композитните материјали секогаш може да се разгледува дека е составен од повеќе фази. Ако го разгледаме процесот на намотување, истиот може генерално да се претстави со блок дијаграм како на Слика 4.3.

На оваа шема процесот е претставен како интеграција од три категории на производни чекори кои генерално го опфаќаат целокупниот произведен процес:

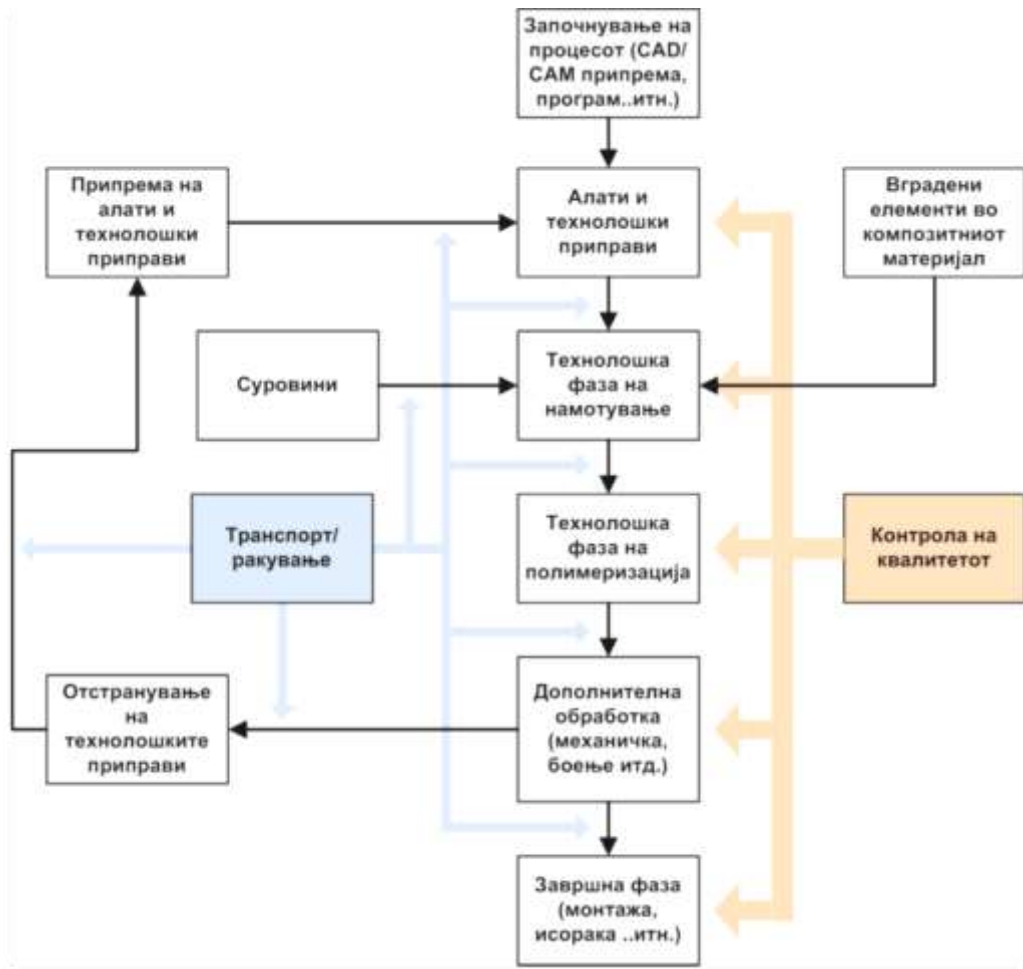
- процесни чекори поврзани со припремата на материјалите и суровините, како и директното производство со постапката на намотување и полимеризација на матрицата на композитот,

- производни чекори поврзани со контрола на квалитетот и карактеристиките на производот во подделни меѓуфазни операции но и завршното тестирање пред испорака и

- фазите на транспорт на материјалите, суровините и меѓупроизводот и на крај готовиот производ.

Главните фази кои може да се разгледуваат и влијаат на крајните перформанси и цена на производот се следните:

Движење и додавање на суровини – Доколку се работи за производствен процес каде потрошувачката на суровини е значителна, континуираното додавање на суровините е еден од факторите кој најчесто се зема во обзир за непречено одвивање на подделните делови од процесот. Тоа пред се, се однесува на додавањето на смолните системи. Без разлика на употребуваниот тип на смолни системи, тој процес бара претходна припрема во вид на мешање (миксирање) на две или повеќе компоненти во строго дефинирани тежински односи и загревање во определени температурни граници. Самото додавање на смолниот систем во процесот, доколку истиот не е автоматизиран, се одвива рачно со дотурање во садовите за импрегнација или пак во подобар случај со помош на трансфер пумпа која го заменува рачното дотурање. Постапката на припремата на смолниот систем има опасности по здравјето на операторите. Тоа е сериозен ризик и покрај правилото за задолжителното носење на заштитни средства и облека.



Слика 4.3. Блок дијаграм на процесот на намотување на влакна

Фаза на намотување – Самиот процес на намотување се реализира на машина за намотување на влакна (стаклени, јаглородни или друг тип на влакна). Овај дел од процесот (постапката на намотување) е автоматски и претставува автоматско извршување на нумерички програм на едновремено програмирано управување на повеќе оски на движење со помош на контролери за нумеричко управување. Бидејќи се работи за намотување со континуирани влакна (стаклени, јаглородни, арамидни и др...) нивното поставување на алатот за намотување на почетокот како и нивно отсекување на крајот од процесот е најчесто постапка која во основа бара време и непосреден контакт на операторот со суровините (смола, влакна). Во зависност од типот на производот, овој чекор од процесот може да има голема важност за производниот капацитет.

Алати и технолошки приправи - Фазата на намотување се одвива врз алати и технолошки приправи кои после процесот се демантираат и повторно се употребуваат. Нивната монтажа, демонтажа, припрема и складирање можат да бидат предмет на разгледување при на анализа на вкупната цена на производот.

Фаза на термичка обработка – Ова всушност претставува завршна фаза на полимеризација на смолни системи каде се менуваат карактеристиките на истите и каде композитниот материјал најчесто ја добива својата конечна форма. Оваа фаза се прави во печки кои се стационарни или континуирани (систем на лента). Управување со процесните термички параметри како што се температурите и вентилација на испарувањата во печките е дел од автоматското управување, а дополнително постои манипулација и транспорт поврзан со овие печки.

Транспорт и ракување - Во пооделните фази транспортот на материјалите, алатите и готовите производи претставува многу важна активност и е голем потрошувач на времето за производство. Оваа фаза најчесто се одвива со помош на вообичаената опрема за манипулација како што се кранови, вилушкари, транспортни колички и сл. Меѓутоа, постојаниот притисок за намалување на трошоците за производство, зголемување на производствениот капацитет преку зголемување на ефективното време на користење на основните технолошки капацитети во дадениот процес (во овој случај машините за намотување), направија фазата на транспорт да биде една од примарните точки за интервенција или анализа во процесите за производство на композитни материјали.

Контрола на квалитетот – Квалитетот на производот отсекогаш е активност на која и се посветува посебно внимание. Се воведуваат различни методологии и системи за негова контрола.

4.5. Критериуми за анализа на оправданоста за производство на композитни цевки

Приодите за анализа на оправданоста и бенефициите од производството на композитни цевки можат да бидат различни. Тие можат да бидат чисто економска категорија каде со примена на некои од аналитичките методи се анализира економската исплатливост на инвестицијата за нивното производство. Меѓутоа, одлуката е исто така и дел од стратешка ориентација која треба на подолг период да доведе до конкурентна предност или пак примената на индустрискиот процес за намотување на влакна да е од клучно значење за дадениот производ.

Економиката на производството на композитни цевки е од големо значење. Тоа се однесува повеќе на стандардните типови на композитни цевки кои се во директна конкуренција со постарите типови, како што се металните и челичните цевки. Но, кога станува збор за специјални типови на композитни цевки како што се на пример цевки со голем волумен наменети за преку-океански транспорт на природен гас под притисок, техничко-технолошката категорија го има едно од примарните места во оваа анализа. Секако, анализата на економската оправданост е исто така задолжителна за да се определи конкурентната позиција во однос на постоечките или другите алтернативни методи за реализација на дадениот проект.

Значи, во основа одлуката за воведување и производство на композитни цевки никогаш не е базирана на само еден приод или критериум на анализа, туку таа е комбинација на повеќе критериуми или стратегии во анализата.

Најчесто економскиот ефект при производство на композитни материјали се гледа во порационалното искористување на суровините и помошните материјали, а со тоа и отпадоците и штетните материји кои како резултат на процесот контролирано или неконтролирано се исфрлаат или пак плански се одлагаат во околината. Доколку процесите за производство на композити се повеќе компактни и фазите на производството се поврзани со ефикасност во искористување на опремата, временскиот циклус по единица производот е пократок. Од тоа може да се заклучи

дека во оптимизираните односно подобрените процеси за производство на композитни материјали, цената на потрошената енергија по единица производ е помала.

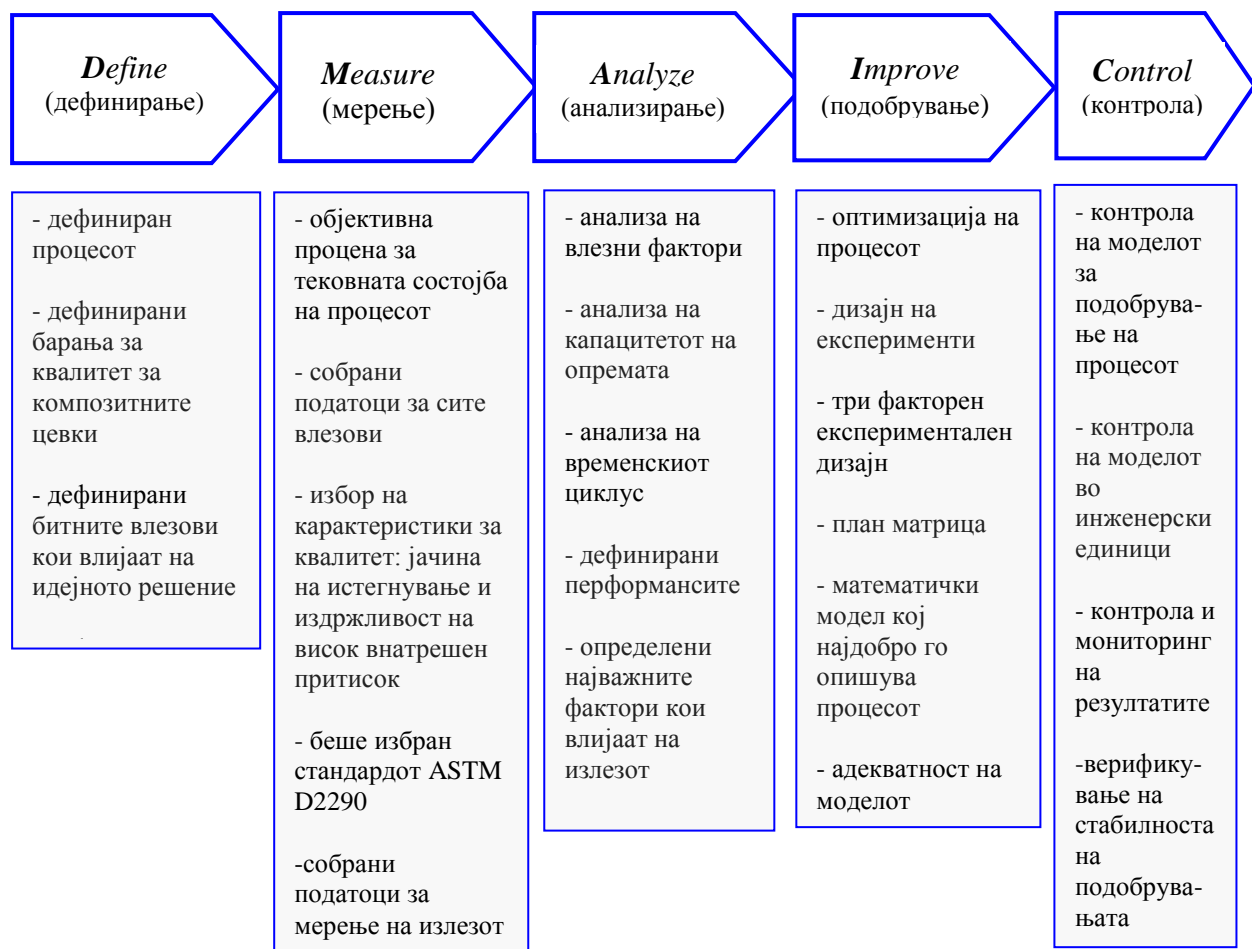
Комплексните производни процеси за производство на композитни материјали каде е потребно прецизно управување со процесните параметри бара повисок степен на автоматизација. Типот на автоматизација најчесто се јавува во форма на компјутерски управувани машини, автоматизирани системи за манипулација со материјалите и производите, системи за контрола на квалитетот на поодделните чекори во производниот процес како и процесите на монтажа и контрола на карактеристиките и квалитетот на финалниот производ од композитен материјал. Автоматизација ја зголемува продуктивноста. Целта која се бара од применетата автоматизацијата е да се добие оптимална комбинација на автоматизирана технологија и мануелни операции за да се постигне рентабилно производство, како и повисок и постојан квалитет на производите [25].

Композитните цевки кои се издржливи на висок внатрешен притисок, а се применуваат главно за транспорт на течности, имаат повеќе предности во споредба со металните и челичните цевки. Некои од основните предности се помалата тежина, отсуството на корозија, двојно подолг период на повторно тестирање, повисок степен на безбедност во присуство на оган и др. Сите овие предности го оправдуваат нивното производство, но не се секогаш доволни за пошироко распространување на овој тип на композитни цевки низ пазарите на светот. Посебно тоа е тешко на пазарите кои се сензитивни на цената на композитните цевки. Заради цената на материјалот кој се користи во металните и челичните цевки како и начинот на производство кое се стандардизирало и се одвива (во многу случаеви) на стари производни линии кои се одамна амортизирани, цената на металните и челичните цевки е сеуште поконкурентна во однос на композитните. Но, ова доаѓа до израз доколку се прави само едноставна споредба на цена, без да се земаат во обзир предностите на композитните цевки како и останатите повисоки трошоци на експлоатација на челичните цевки.

Затоа, намалување на трошоците на производство преку повисок степен на автоматизација, кое секако е проследено со високо сериски производни капацитети, како и постојаноста на квалитетот и неговото автоматизирано следење во текот на целиот производен тек, согласно барањата на стандардите, е еден од моменталните правци во кои е насочен овој сегмент од индустријата за производство на композитни материјали [22-25].

5. ПРЕДЛОЖЕН МОДЕЛ ЗА РАБОТА

За реализација на поставената цел: подобрување на процес за производство на композитни цевки беше применет шест сигма моделот – DMAIC. Шематскиот приказ за применетиот метод за подобрување на процесот е претставен на слика 5.1.



Слика 5.1. Шематски приказ на шест сигма DMAIC моделот за подобрување на процес за производство на композитни цевки

Во рамките на применетата сигма методологија, во првиот чекор *Define* (дефинирање) беше дефиниран процесот и најчестите барања за квалитет за композитните цевки односно нивна издржливост на високи внатрешни притисоци.

Исто така, беа утврдени битните влезови кои влијаат на идејното решение, а тоа се: конститутивните материјали на композитната структура, начинот на намотување на влакната, брзината на намотување, аголот на намотување, тензијата на влакната, вискозитетот на матрицата и друго. Врз основа на тоа беше определена целта во овој магистерски труд: оптимизација или подобрување на процесот за производство на композитни цевки преку избор на влезни фактори кои најмногу влијаат на излезот т.е. карактеристиките на крајниот производ.

Во вториот чекор *Measure* (мерење) беше направена објективна процена за тековната состојба на процесот што всушност претставува основа за негово подобрување. Беа собрани податоци за сите влезови: тип на зајакнувачки влакна, јачина на влакна, тип на матрица, вискозитет на матрица, распоред на бомбините на кои се намотани влакната, параметрите на машината за намотување на влакна и многу други. Во оваа фаза беше направен и избор на карактеристиките за квалитет на композитните цевки односно беше избрана јачина на истегнување на композитни прстени и издржливост на внатрешен притисок на цевките како излез. Беа дефинирани и стандардите по кои ќе се врши нивно тестирање и беа собрани податоци за мерење на карактеристиките како и анализа на системот за мерење. Во оваа фаза беа собрани податоци за процесот за да се направи добра основа за постигнување на ефикасност на истиот.

За испитување на јачината на истегнување на композитните цевки беше избран стандардот ASTM D2290 [26]. Според тој стандард, од композитните цевки треба да бидат отсечени прстен – примероци за тестирање. Дополнително, за тестирањето на примероците треба да биде изработен и помошен алат според барањата на стандардот.

Во третата фаза од шест сигма методологијата *Analyze* (анализирање) беше направена анализа на влезните фактори кои најмногу влијаат на процесот и дека со нивно менување може да се влијае на подобрување на процесот и на создавање на производ со барани карактеристики. Врз основа на практично искуство на производните капацитети поврзани со производство на композитни структури како и врз основа на искуството во фирмата Микросам од Прилеп која произведува композитни цевки со процесот на намотување на влакна, беа определени факторите кои влијаат врз квалитетот на производот. Од сите влезни фактори беа избрани три кои најмногу влијаат на карактеристиките на композитните цевки, а тоа се: брзина на намотување, тензија на влакната и аголот на намотување. Тоа значи дека за оптимизација односно подобрување на процесот треба да се анализира влијанието на

трите фактори: x_1 , x_2 , x_3 врз излезот Y односно врз јачината на истегнување на композитните прстени или издржливоста на висок внатрешен притисок на цевките.

Во четвртата фаза *Improve* (подобрување) беше направена оптимизација на процесот за што беше користен дизајн на експерименти DOE (Design of Experiments). За дизајнирањето на процесот за добивање на композитни цевки, беше користен методот на планиран експеримент кој што претставува ефикасен метод и овозможува добивање на максимални информации од минимален број на експерименти. Во предходната постапка беше определено дека три фактори најмногу влијаат на процесот, а исто така беше анализирана и минималната и максималната нивна граница на варирање т.е. нивото на варирање. Процесот кој зависи од три фактори, x_1 , x_2 , x_3 и кога секој фактор има две нивоа на варирање претставува дизајн кој е наречен 2^3 факторен дизајн.

За дизајнот на експериментите за подобрување на процесот за производство на композитни цевки, беше користен три факторен експериментален дизајн со две нивоа на варијација. За 2^3 факторен експеримент потребни се 8 тестови ($2^3 = 8$), секој со различна комбинација на факторите и нивоата. Притоа, беше составена план - матрицата на експериментот и тоа на следниот начин. За:

- x_1 - нивоата се менуваат на секој опит (т.е. серија на опити),
- x_2 - нивоата се менуваат на секои два опити,
- x_3 - нивоата се менуваат на секои четири опити, итн.

Согласно план – матрицата (Табела 5.1), потребно е да се изведат осум експерименти со варирање на нивото на сите три параметри.

Табела 5.1. План матрица на експериментот

Бр. на експ.	<i>Матрица на планот на експериментот</i>							
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Во првата колона варијаблата се менува (-1, +1, -1....) на секоја 2^0 вредност.

Во втората колона варијаблата се менува (-1, -1, +1, +1...) на секоја 2^1 вредност.

Во третата колона варијаблата се менува (-1,-1,-1,-1,+1,+1,...) на секоја 2^2 вредност.

n-тата варијабла се менува на секоја 2^{n-1} вредност.

Претпоставениот модел од прв ред за процесот на намотување на влакна со три фактори е:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 + \varepsilon$$

Во последната пета фаза *Control* (контрола) – беше направена верификација на моделот за подобрување на процесот. Исто така беше направен модел во инженерски единици и беше направена контрола на истиот. Беше направена контрола и мониторинг на резултатите од испитувањата на карактеристиките како и верификување на стабилноста на подобрувањата.

6. ПРАКТИЧЕН ДЕЛ

6.1. Материјали користени за експериментите

Во текот на експерименталните тестови како зајакнувач за изработка на композитни цевки беа користени стаклени влакна, а како матрица беше користена термореактивна епоксидна смола.

Три компонентен епоксиден систем од Huntsman беше користен во ова истражување: Araldite LY1135-1/Aradur 917/Accelerator 960-1. Зацврстувачот е анхидриден, додека катализаторот е амински. 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 композитни делови 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 6.1 се дадени карактеристиките на компонентите на смолниот систем Araldite LY1135-1/Aradur 917/Accelerator 960-1.

Во табелата 6.2 е даден соодносот на компонентите со кој е работено, додека табела 6.3 ги прикажува карактеристиките на смесата. Вискозноста на смолниот систем на температура од 25°C е 600-1000 mPas, додека со зголемување на температурата истата се намалува. Времето на работа (Pot-life) на системот е 56 до 62 часа на 23 °C.

Во ова истражување смолата во кадата не беше греена, 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). Беше избрано прстените да се печат на температура од 100 °C во време од 6 часа. Бидејќи кадата не беше загреана вискозноста на смолниот систем беше поголем 600-1000 mPas, што е битно да се напомене за регулацијата на соодносот на смола/влакно.

Табела 6.1. Карактеристиките на компонентите на смолниот систем [27]

Araldite® LY 1135-1		
Aspect (visual)	clear, pale yellow liquid	
Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 2	
Epoxy content (ISO 3000)	5.30 - 5.45	[eq/kg]
Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	10000 - 12000	[mPa s]
Density at 25 °C (ISO 1675)	1.15 - 1.20	[g/cm ³]
Flash point (ISO 2719)	> 200	[°C]
Aradur® 917		
Aspect (visual)	clear liquid	
Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 2	
Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	50 - 100	[mPa s]
Density at 25 °C (ISO 1675)	1.20 - 1.25	[g/cm ³]
Flash point (ISO 2719)	195	[°C]
Accelerator 960-1		
Aspect (visual)	light yellow liquid	
Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 8	
Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	150 - 300	[mPa s]
Density at 25 °C (ISO 1675)	0.95 - 0.97	[g/cm ³]
Flash point (ISO 2719)	110 - 120	[°C]
Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40 °C	[°C]

Табела 6.2. Сооднос на компонентите [27]

<i>Components</i>	<i>Parts by weight</i>	<i>Parts by volume</i>
Araldite® LY 1135-1	100	100
Aradur® 917	90	86
Accelerator 960-1	2 - 3	2.5 - 3.5

Табела 6.3. Карактеристики на смолниот систем [27]

INITIAL MIX VISCOSITY (HOEPPLER, ISO 12058-1B)	[°C]		[mPa s]
	at 25		600 - 1000
	at 40		200 - 300
	at 60		< 75
VISCOSITY BUILD-UP (HOEPPLER, ISO 12058-1B)	<i>Components [pbw]</i>		<i>System 1 System 2</i>
	Araldite® LY 1135-1		100 100
	Aradur® 917		90 90
	Accelerator 960-1		3 5
POT LIFE (TECAM, 65 % RH, 100 G)	[°C]		<i>System 1 System 2</i>
	at 23	[h]	56 - 62 18 - 24
	at 40	[h]	11 - 15 4 - 7
GEL TIME (HOT PLATE)	[°C]		<i>System 1 System 2</i>
	at 80	[min]	52 - 60
	at 100	[min]	15 - 21 10 - 15
	at 110	[min]	5 - 8
	at 120	[min]	3 - 5
	at 130	[min]	1.5 - 3
	at 140	[min]	1 - 2

Како зајакнувачки материјал во текот на експериментите се корисета Е - стаклени влакна тип 185Р со финост од 1200 tex, производ на компанијата Owens Corning. Стаклените влакна се ефикасни од гледна точка јачина/тежина но и многу економични. Стаклените влакна можат да бидат Е-стакло (подобрена електрична спроводливост), С-стакло (висока хемиска отпорност), R-стакло (високи перформанси), А-стакло и Н-стакло (висока специфична јачина на истегнување). Повеќе застапени се Е и S стаклени влакна. Стаклените влакна се најчесто корисен зајакнувач. Тие се отпорни на корозија и имаат ниски трошоци во споредба со другите зајакнувачи.

6.2. Производство на композитни цевки

Лабораториските експерименти т.е. производството на композитни цевки за оваа магистерска работа се правеше во лабораториите во Институтот за современи композити и роботика во Прилеп.

За производство на композитните цевки се користеа 10 бобини на Е-стаклени влакна од типот 185Р со 1200 tex. Стаклените влакна беа импрегнирани во системот епоксидна смола Araldite LY564 / Aradur 917 / Accelerator 960-1. Примероци композитни цевки со различни дизајни беа произведени со помош на лабораториската машина за намотување на влакна тип MAW FB 6/1 со шест оски, ролерски тип и када за смола,

произведена од Микросам АД. Стаклените влакна со одредена тензија поминуваат низ кадата со смола каде што се натопуваат т.е. импрегнираат пред да се намотаат на мандрелот. Потоа, со соодветна брзина на намотување и под одреден агол се намотуваат на ротирачкиот мандрел. Тензијата на влакната е значајна за да се држат во одреден правец кога се намотуваат на површината на мандрелот. Аголот на намотување претставува аголот помеѓу влакното и на линија на површината на мандрелот која е паралелна со оската на мандрелот. Тежинскиот сооднос помеѓу влакната и смолата во сите експерименти беше 75:25 wt. %. После намотувањето на влакната на мандрелот, примероците беа печени со индустриски грејач на 80°C и на 140°C во времетраење од четири часа на двете температури, а потоа беа извлечени од мандрелот. На слика 6.1 претставена е постапката на намотување на влакна во лабораторијата на Институтот за современи композити и роботика и изгледот на произведените композитни цевки.



а)



б)

Слика 6.1. а) Намотување на влакна во лабораторијата на Институтот за современи композити и роботика, б) изглед на композитни цевки

6.3. Дизајнирање на експериментите

При изведувањето на некој експеримент намерно се менуваат една или повеќе процесни варијабли (или фактори) со цел да се види како ќе се одразат врз една или повеќе одзивни варијабли. Статистички осмислените експерименти претставуваат

ефикасна постапка за планирање на експериментите, така што добиените податоци можат да бидат анализирани за да доведат до валидни и објективни заклучоци.

Планирањето на експериментите почнува со определување на целите на експериментот и со избор на процесните фактори кои ќе се проучуваат. Планирањето на експериментите е како нацрт т.е. проект на детално испланирани експериментални постапки пред да се почне со самиот експеримент.

За планирање на експериментите во рамките на оваа магистерска работа користен е три факторен експериментален дизајн, со варирање на три фактори на два нивоа:

– **Брзина на намотување (x_1)** – со минималната брзина од 5, 25 m/min, а максималната 21 m/min.

– **Тензија на стаклените влакна (x_2)** – со минималната тензија е 64 N, а максималната 110 N.

– **Агол на намотување (x_3)** – во дадениот пример минималниот агол е 10° , а максималниот 90° .

План – матрицата на експериментот е дадена во табела 6.4.

За 2^3 факторниот експериментален дизајн беа направени 8 експерименти ($N = 2^3 = 8$), односно беа направени 8 различни типови композитни цевки и тоа секоја со различна комбинација на факторите и нивоата. Од секоја комбинација беа испитувани по две тест епрувети - композитни прстени (2 реплики), така што вкупно беа извршени 16 тестирања. Резултатите од секој тест (со соодветното ниво на факторите) се претставени во табелата 7.1.

На слика 6.2 претставена е постапката за намотувањето на влакна под различни агли.



а) агол на намотување на влакна 10°



б) агол на намотување на влакна 90 °

Слика 6.2. Производство на композитни цевки со различен агол на намотување на влакна

Табела 6.4. План матрица на експериментот

Бр. на експ.	Матрица на планот на експериментот								карактеристики (услови 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 намотување (m/min)	X ₂ тензија на влакна (N)	X ₃ агол на намотување (°)
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	21	110	90
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	5.25	110	90
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	21	64	90
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	5.25	64	90
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	21	110	10
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	5.25	110	10
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	21	64	10
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	5.25	64	10

Основно ниво	X ₁ = 13,125	X ₂ = 87	X ₃ = 50
Интервал на варијација	7,875	23	40
Горно ниво	5,25	64	10
Долно ниво	21	110	90

6.4. Определување на јачина на истегнување на композитните цевки

За определување на издржливост на високи притисоци на композитните цевки се врши тестирање на јачината на истегнување (hoop tensile strength) на примероци т.е.

композитни прстени. Според тоа тестирање се мери издржливоста во правец на дијаметарот, а должината се зема за константна т.е. се занемарува.

За испитување на јачината на истегнување на композитните прстени беше користен стандардот ASTM D2290 [26]. Според тој стандард, од секоја композитна цевка беа сечени по два прстени – примероци за тестирање. За тестирањето на примероците беше изработен помошен алат според барањата на ASTM D2290. На слика 6.3 претставен е шематски приказ на прстен и алат за тестирање според ASTM D2290.

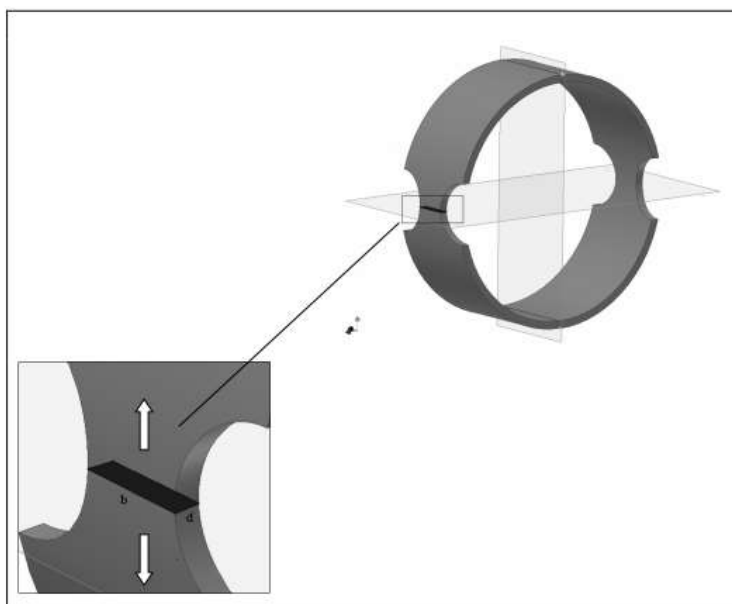
Димензијата на ослабените делови на примероците беше измерена со дигитално подвижно мерило (шублер). За секој примерок беше измерена дебелината на ѕидот на четири места, од кои две се на ослабените делови. Ширината на овие делови исто така беше измерена. Површината на попречниот пресек во ослабените области се пресметува како производ од минимумот на дебелината и ширината (Слика 6.4) [26]. Во табела 6.5 дадени се димензиите на примероците (прстените) за тестирање.



Слика 6.3. Прстен примерок и алат заедно со прстенот за тестирање

Примероците се поставуваат на специјален алат во форма на дводелен диск, така што ослабените делови на примерокот се во правец на линијата на разделување на двете половини од дискот.

Тестовите беа изведени со константна брзина на раздвојување на дисковите половини, се до настанување на кинење (пукање) на примероците. За секоја испитувана група на примероци беше определувана средна аритметичка вредност на измерените крајни јачини на истегнување.



Слика 6.4. Попречна површина со која се одредува крајното напрегање на истегнување

Табела 6.5. Димензии на тест примероците

Ознака на примероците		b (mm)	d (mm)	A (mm) ²
1	1-1	14,07	3,20	45,01
	1-2	14,01	3,19	44,76
2	2-1	14,14	3,14	44,40
	2-2	14,14	3,12	44,12
3	3-1	14,00	3,08	43,19
	3-2	14,07	3,09	43,49
4	4-4	14,15	3,65	51,65
	4-5	14,14	3,65	51,61
5	5-1	14,12	3,27	46,17
	5-2	14,2	3,27	46,43
6	6-1	14,12	3,15	44,48
	6-2	14,08	3,20	45,06
7	7-1	14,08	3,17	44,70
	7-2	14,10	3,15	44,42
8	8-1	14,00	2,95	41,30
	8-2	14,00	2,95	41,30

Јачина на истегнување на примероците се пресметува со примена на следнава

равенка:
$$\sigma = \frac{F_{\max}}{2 \cdot A_m} \quad (6-1)$$

каде:

σ - крајна јачина на истегнување, МРа

F_{max} - максимална сила на кинење, N

A_m - површина на попречниот пресек на ослабениот дел на прстенот, $d \times b$, mm².

Тестовите за сите примероци се изведени на универзална машина за тестирање на јачина на истегнување со максимална сила до 250 KN, која е прикажана на слика 6.5.



Слика 6.5. Универзална машина за тестирање

6.5. Техничко технолошка и економска анализа на различни типови композитни цевки споредбено со конвенционалните цевки за иста намена

За да се направи техничко технолошка и економска анализа на различни типови композитни цевки споредбено со конвенционалните метални цевки од прохром наменети за транспорт на течности или за резервоари, беа разгледувани 6 композитни цевки сите различно дизајнирани и добиени од различни материјали. Имено, беа анализирани следните типови композитни цевки:

1. Композитни цевки врз основа на стаклени влакна (тип: OCV 1200tex) и епоксидна смола (тип: Araldite LY 564 (1135)).
2. Композитни цевки врз основа на хибриден материјал: стаклени влакна (тип: OCV 1200tex) + јаглородни влакна (тип Toray T700 800 tex) и епоксидна смола (тип: Araldite LY 564 (1135)).
3. Композитни цевки врз основа на јаглородни влакна (тип Toray T700 800 tex) и епоксидна смола (тип: Araldite LY 564 (1135)).

Од сите три типа композитни цевки беа анализирани по два различни примероци – цевки со различен агол на намотување од 10° и 90° т.е. максималната и минималната вредност на аголот на намотување (како што беше земено и во план матрицата при дизајнирањето на експериментите, Табела 6.4). Дијаметарот за сите анализирани цевки беше ист односно 100 mm, должината 1000 mm додека дебелината приближно 3 mm. Паралелно, во анализата беа вклучени и податоци од литературни сознанија за конвенционални метални цевки од прохром. Во табела 6.6 дадени се ознаките и основните податоци за анализираниите примероци композитни цевки.

Табела 6.6. Основни податоци за анализираниите цевки

Ознака на комп. цевка	Конститутивни материјали	Агол на намотување на влакната, °	Дебелина на комп. цевка, mm
1-1	стаклени влакна епоксидна смола	10	3,28
1-2	стаклени + јаглеродни влакна епоксидна смола	10	3,32
1-3	јаглеродни влакна епоксидна смола	10	3,37
2-1	стаклени влакна епоксидна смола	90	3,23
2-2	стаклени + јаглеродни влакна епоксидна смола	90	3,13
2-3	јаглеродни влакна епоксидна смола	90	3,32

Анализата за шесте примероци композитни цевки беше направена со користење на софтверската програма Hoffman Engineering која е наменета за дизајнирање и пресметка на различни типови на производи од композитни материјали [28].

Апликацијата е достапна на следната веб адреса:

<http://www.hoffmann-engineering.com/co/main.asp>

За користење на истата е потребно да се поседува право на користење со регистрирано корисничко име и лозинка [28]. Оваа анализа беше правена на достапен софтвер во Институтот за современи композити и роботика во Прилеп.

Инженерот кој работи на технологијата на композитните материјали во текот на своите истражувања мора често да прави споредба на карактеристиките на композитите со конвенционалните метални легури.

Една од најголемите разлики помеѓу композитните и конвенционалните материјали, како што се алуминиумските и железните легури, е тоа што композитите се типично анизотропни материјали. Тоа значи дека карактеристиките на композитните материјали се различни во различни насоки на материјалот и може да варираат во широк интервал на вредности.

За стандард кој треба да го задоволат анализираните композитни цевки е избран стандардот ISO 11439.2000 - ASTM D1599 [29]. Согласно овој стандард една од основните карактеристики која треба да бидат задоволена е внатрешниот притисок на разрушување (burst pressure), како и односот на напрегање на влакната - зајакнувачот. Оваа карактеристика е компатибилна односно соодветствува на лабораториски добиените вредности за јачина на истегнување на тест примероците - композитни прстени.

Минималниот притисок на разрушување не треба да биде помал од вредностите дадени во Табела 6.7.

Според стандардот, композитните цевки треба да бидат проектирани со висок степен на сигурност кога се подложени на постојано напрегање што во овој случај се однесува на циклично напрегање. Оваа сигурност треба да биде постигната со задоволување или надминување на односот на напрегање на композитното зајакнување, согласно Табела 6.7. Односот на напрегања е дефиниран како напрегање на влакната на минимален притисок на разрушување поделен со напрегањето на влакната на работниот притисок [29]. Работен притисок на овие композитни цевки е 50 бари.

Табела 6.7. Минимален притисок на разрушување и однос на напрегање за цевки [29]

Тип на влакна	Однос на напрегање	Притисок на разрушување (бари)
Стаклени Влакна	3,65	180
Јаглеродни Влакна	2,35	117
Хибридни Влакна	3,0*	148 *

*Односот на напрегање и притисокот на разрушување треба да се калкулира согласно табелата

Со примена на софтверскиот пакет Hoffman Engineering прво се дизајнира односно структурира сидот на композитната цевка кој всушност се состои од повеќе слоеви. Композитната цевка е изградена од повеќе слоеви. Секој слој е изграден од влакна поставени под одреден агол. Влакната во слоевите може да бидат поставени под исти или различни агли со што се овозможува композитните цевки да ги издржи предвидените внатрешни и надворешни оптоварувања. Композитните цевки ретко се изградени од слоеви каде влакната се поставени само под еден агол. За да може композитен материјал да издржи различни оптоварувања во различни правци, се дизајнира слоевит композит со комбинација на влакната во слоевите во повеќе агли. Доколку композитен дел треба да издржи внатрешен притисок тогаш напоните во радијален правец се многу поголеми од напоните во надолжен правец.

Потоа, во истиот софтвер се определуваат карактеристиките на композитните слоеви и се пресметува очекуваниот внатрешен притисок на разрушување на композитната цевка. Со повеќекратна калкулација на различни варијанти на структурата на слоевите и нивна оптимизација се определува оптимален начин на намотување на композитна цевка со карактеристики кои ќе ги задоволат барањата на стандардот. Како влезни променливи во таа оптимизација се: типовите на суровини (влакна и смола), аглите на намотување на поодделните слоеви, бројот на слоевите и нивниот распоред.

Во рамките на овој магистерски труд беше направена анализа на шест композитни цевки и за нив беше земен ист дијаметар, иста должина, а како променливи параметри беа:

- типот на материјалот од кој се конституирани композитните цевки (јаглерод/епоксид, јаглерод – стакло/епоксид и стакло/епоксид) и
- аголот на намотување на влакната (10° и 90° степени).

На слика 6.6 се претставени прозорци на софтверската апликација во кои се внесуваат податоци за градење на слоевите на композитниот сид на сите шест композитни цевки посебно, а во табела 6.8 е дадена структурата на композитните сидови за сите шест примероци.

Designation (N#1358) Glass 10

D_{Internal} Ø 100 mm Machined to Ø 106,74 mm

Length 1000 mm Adjust Fiber volume by diameter or weight: Ø 106,74 mm, 2,173 kg

Resin: Aralditei½ LY 556/Aradurii½ 917-Aralditei½ Hardener Accelerator DY 070

Only suitable Filament Winding Recipes
 Show public Resins

Lamina Build-Up Add a lamina

Lam	Creel Composition	Bandwidth	Angle	Cycles	Vf	Div Mark
1	FW548/4 Bob W11,9 Composite Oracle Roving 1084 - 1200 1K	FW 11,9 mm	10°	26	55%	1
2	FW548/4 Bob W11,9 Composite Oracle Roving 1084 - 1200 1K	FW 11,9 mm	10°	27	55%	1
3	FW548/4 Bob W11,9 Composite Oracle Roving 1084 - 1200 1K	FW 11,9 mm	10°	27	55%	1
4	FW548/4 Bob W11,9 Composite Oracle Roving 1084 - 1200 1K	FW 11,9 mm	10°	27	55%	1
5	FW548/4 Bob W11,9 Composite Oracle Roving 1084 - 1200 1K	FW 11,9 mm	10°	28	55%	1
6	FW548/4 Bob W11,9 Composite Oracle Roving 1084 - 1200 1K	FW 11,9 mm	87,94°	1	55%	1

Buttons: Delete Marked Layers, Adjust angle to cycles, Adjust cycles to angle, Original Bandwidth, Set Sequence

а) композитна цевка тип 1-1

Designation (N#1355) Carbon/ glass 10

D_{Internal} Ø 100 mm Machined to Ø 106,65 mm

Length 1000 mm Adjust Fiber volume by diameter or weight: Ø 106,65 mm, 1,898 kg

Resin: Aralditei½ LY 556/Aradurii½ 917-Aralditei½ Hardener Accelerator DY 070

Only suitable Filament Winding Recipes
 Show public Resins

Lamina Build-Up Add a lamina

Lam	Creel Composition	Bandwidth	Angle	Cycles	Vf	Div Mark
1	FW548/4 Bob W11,9 Composite Oracle Roving 1084 - 1200 1K	FW 11,9 mm	10°	26	55%	1
2	FW548/4 Bob W11,9 Composite Oracle Roving 1084 - 1200 1K	FW 11,9 mm	10°	27	55%	1
3	FW548/4 Bob W11,9 Composite Oracle Roving 1084 - 1200 1K	FW 11,9 mm	10°	27	55%	1
4	FW637/4 Bob W11,9 Torayca T700S 12K	FW 11,93 mm	10°	27	55%	1
5	FW637/4 Bob W11,9 Torayca T700S 12K	FW 11,93 mm	10°	28	55%	1
6	FW637/4 Bob W11,9 Torayca T700S 12K	FW 11,93 mm	87,94°	1	55%	1

Buttons: Delete Marked Layers, Adjust angle to cycles, Adjust cycles to angle, Original Bandwidth, Set Sequence

б) композитна цевка тип 1-2

Designation (N#1356) Carbon 10

D_{internal} \varnothing 100 mm Machined to \varnothing 106,57 mm

Length 1000 mm Adjust Fiber volume by diameter or weight: \varnothing 106,57 mm
1,63 kg

Resin: Aralditek LY 556/Aradurk 917-Aralditek Hardener Accelerator DY 070

Only suitable Filament Winding Recipes
 Show public Resins
Select Sponsor-based materials:

Lamina Build-Up Add a lamina

Lam	Creel Composition	Bandwidth	Angle	Cycles	Vf	Div	Mark
1	FW637/4 Bob W11,9 Torayca T700S 12K	FW 11,93 mm	10°	26	55	1	
2	FW637/4 Bob W11,9 Torayca T700S 12K	FW 11,93 mm	10°	27	55	1	
3	FW637/4 Bob W11,9 Torayca T700S 12K	FW 11,93 mm	10°	27	55	1	
4	FW637/4 Bob W11,9 Torayca T700S 12K	FW 11,93 mm	10°	27	55	1	
5	FW637/4 Bob W11,9 Torayca T700S 12K	FW 11,93 mm	10°	28	55	1	
6	FW637/4 Bob W11,9 Torayca T700S 12K	FW 11,93 mm	87,94°	1	55	1	

Delete Marked Layers Adjust angle to cycles Adjust cycles to angle Original Bandwidth Set Sequence

в) КОМПОЗИТНА ЦЕВКА ТИП 1-3

Designation (N#1358) Glass 90

D_{internal} \varnothing 100 mm Machined to \varnothing 106,65 mm

Length 1000 mm Adjust Fiber volume by diameter or weight: \varnothing 106,65 mm
2,145 kg

Resin: Aralditek LY 556/Aradurk 917-Aralditek Hardener Accelerator DY 070

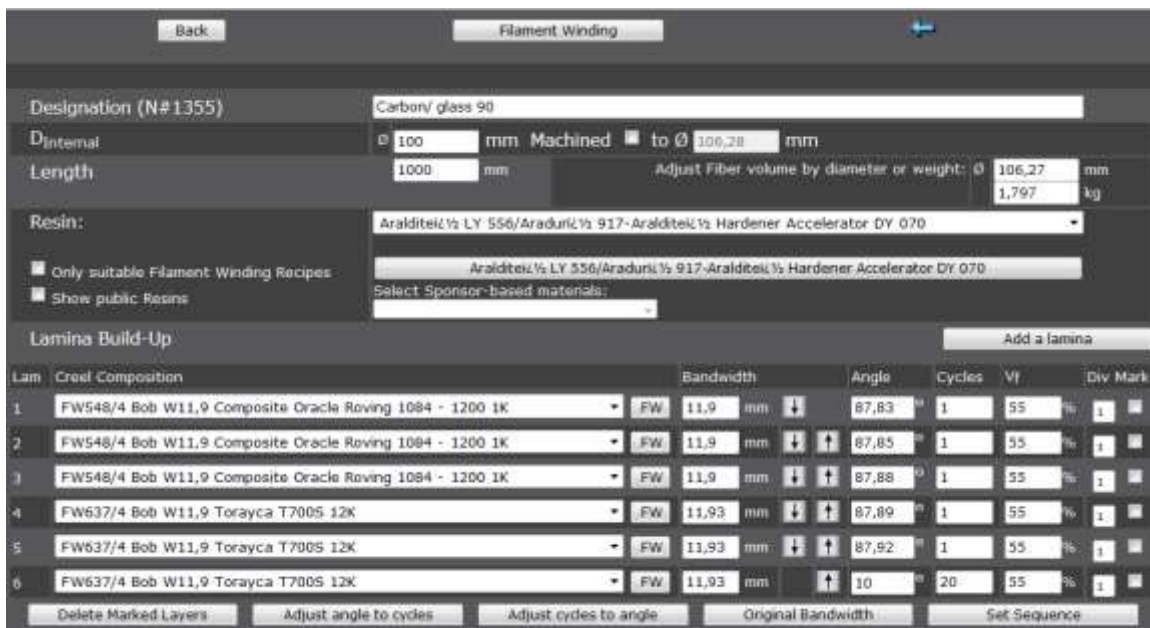
Only suitable Filament Winding Recipes
 Show public Resins
Select Sponsor-based materials:

Lamina Build-Up Add a lamina

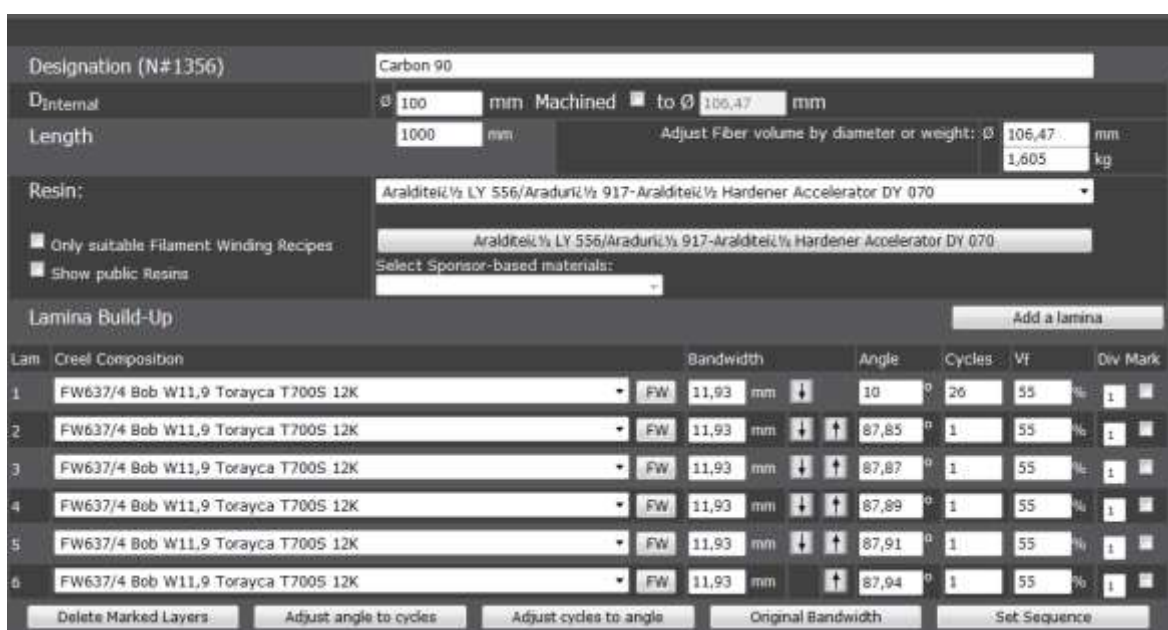
Lam	Creel Composition	Bandwidth	Angle	Cycles	Vf	Div	Mark
1	FW548/4 Bob W11,9 Composite Oracle Roving 1084 - 1200 1K	FW 11,9 mm	10°	26	55	1	
2	FW548/4 Bob W11,9 Composite Oracle Roving 1084 - 1200 1K	FW 11,9 mm	87,85°	1	55	1	
3	FW548/4 Bob W11,9 Composite Oracle Roving 1084 - 1200 1K	FW 11,9 mm	87,88°	1	55	1	
4	FW548/4 Bob W11,9 Composite Oracle Roving 1084 - 1200 1K	FW 11,9 mm	87,9°	1	55	1	
5	FW548/4 Bob W11,9 Composite Oracle Roving 1084 - 1200 1K	FW 11,9 mm	87,92°	1	55	1	
6	FW548/4 Bob W11,9 Composite Oracle Roving 1084 - 1200 1K	FW 11,9 mm	87,94°	1	55	1	

Delete Marked Layers Adjust angle to cycles Adjust cycles to angle Original Bandwidth Set Sequence

г) КОМПОЗИТНА ЦЕВКА ТИП 2-1



д) КОМПЗИТНА ЦЕВКА ТИП 2-2



ѓ) КОМПЗИТНА ЦЕВКА ТИП 2-3

Слика 6.6. Софтверска апликација *Hoffman Engineering* - креирање на слоеви на различни шест типови комозитни цевки

Структурата на композитниот зид се состои од три типови на слоеви на намотување: радијален слој, дијагонал (или хеликоидален) слој и преоден слој. Намотувањето на еден тип на цевка со различен агол е прикажано на сликата 6.2. Преодниот слој е од

посебна важност за континуирано намотување со наизменична промена на аголот на намотување на секој нареден слој (на пример радијален со дијагонален и обратно). На тој начин целиот процес на намотување е континуиран од почеток до крај, без потреба на запирање на процесот и рачно прилагодување на почетната позицијата на машината за секој слој посебно.

Табела 6.8. Структура на композитен сид за шест типови композитни цевки

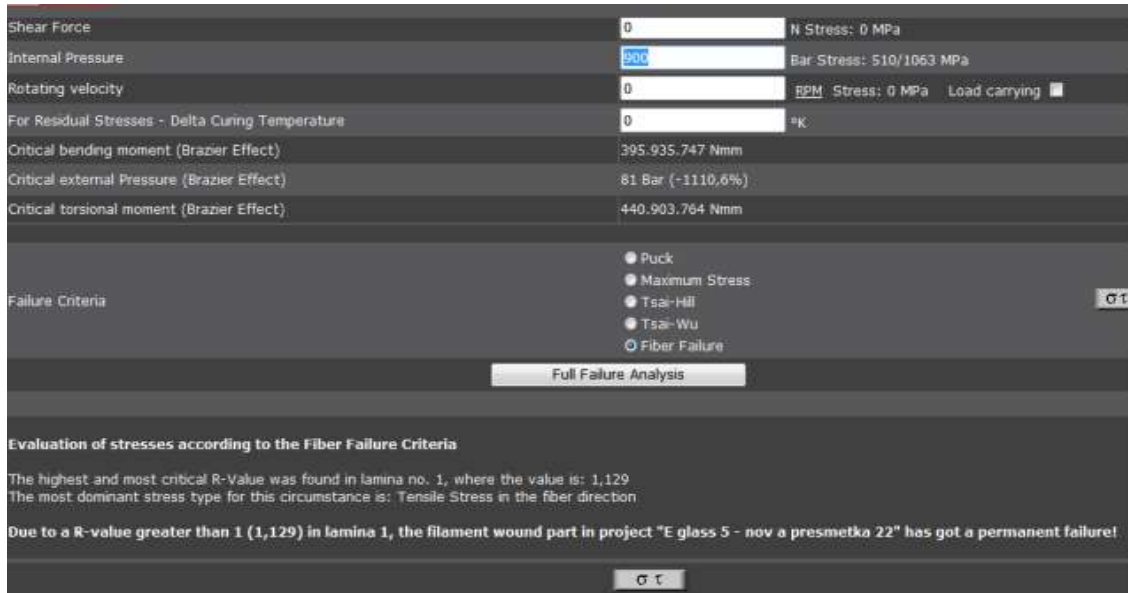
<i>Типови на композитна цевка</i>					
1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2.-3
Радијален 90°	Радијален 90°	Радијален 90°	Дијагонален 10°	Дијагонален 10°	Дијагонален 10°
Дијагонален 10°	Дијагонален 10°	Дијагонален 10°	Радијален 90°	Радијален 90°	Радијален 90°
Дијагонален 10°	Дијагонален 10°	Дијагонален 10°	Радијален 90°	Радијален 90°	Радијален 90°
Дијагонален 10°	Дијагонален 10°	Дијагонален 10°	Радијален 90°	Радијален 90°	Радијален 90°
Дијагонален 10°	Дијагонален 10°	Дијагонален 10°	Радијален 90°	Радијален 90°	Радијален 90°
Дијагонален 10°	Дијагонален 10°	Дијагонален 10°	Радијален 90°	Радијален 90°	Радијален 90°

Откако ќе се внесат слоевите во софтверската програма, се внесуваат оптоварувањата што треба да ги издржи композитната цевка, а потоа се врши избор на критериумот по кој сакаме да ја провериме издржливоста на композитната цевка на предвиденото оптоварување односно внатрешен притисок.

На Слика 6.7. е претставен еден од интерактивните прозорци на апликацијата во која се внесуваат дел од податоците потребни за анализа на композитните структура (цевки).

Како што може да се види од софтверската апликација, има повеќе критериуми по кои може да се провери издржливоста на композитните цевки на висок внатрешен притисок: Puck, Maximum Stress, Tsai – Hill, Tsai-Wu и Fiber Failure. При тестирање на издржливоста на максимален внатрешен притисок кај композитните резервоари и цевки често се јавуваат повеќе т.н. предвремени пукања на слоевитиот композит. На почетокот се појавува пукање на матрицата, потоа на влакната кои се во правец различен од правецот на оптоварувањето, потоа попуштаат одредени слоеви се додека не настане целосно пукање на цевката т.е. композитот. За композитните цевки не се важни почетните предвремени пукања туку, значајно е крајното целосно пукање на даден притисок т.е. burst pressure. При употреба на стаклени влакна, максимално дозволениот притисок се зема со коефициент на сигурност од 2,75 до 3,65 пати поголем од работниот за кој се дизајнира цевката, додека при употреба на јаглородни влакна

2,35 пати поголем од работниот. Меѓутоа, секогаш при секоја софтверска пресметка за издржливост на дизајнираниот композит потребно е да се направи и експериментално тестирање за да се потврди веродостојноста на добиените резултатите од софтверот.



Слика 6.7. Софтверска апликација Hoffman Engineering - дефинирање на параметри за анализа [28]

Во рамките на оваа магистерска работа, при примена на софтверот *Hoffman Engineering*, како критериум за калкулација и анализа на карактеристиките на шесте композитни цевки беше избран критериумот "Tsai Wu". Овој критериум беше избран врз основа на предходни искуства од примена на истиот од страна на Институтот за современи композити и роботика во Прилеп за кој во пракса е докажано дека дава точни податоци односно најблиски до експериментално реално добиените.

7. АНАЛИЗА НА РЕЗУЛТАТИТЕ

7.1. Определување на регресиона равенка т.е. равенката за модел од прв ред со три фактори

Од експерименталните тестови на примероците од 1 до 8 пресметана е јачината на истегнување на примероците со примена на универзална машина за тестирање. За 2^3 сефакторен 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 направени 2 теста (2 реплики), вкупно се извршени 16 тестови. Резултатите од секој тест (со соодветното ниво на факторите) се претставени во табелата 7.1.

Табела 7. 1. Резултати за јачина на истегнување на примероци - композитни прстени

Ознака на примероците		A (mm) ²	F (kN)	F средна вред. (kN)	σ (MPa)	σ средна вред. (MPa)
1	1-1	45,01	80,6	74,55	895,36	830,275
	1-2	44,76	68,5		765,19	
2	2-1	44,40	73,50	69,1	827,70	780,465
	2-2	44,12	64,70		733,23	
3	3-1	43,19	77,60	75,85	898,36	875,14
	3-2	43,49	74,10		851,92	
4	4-4	51,65	72,30	74,95	699,90	725,845
	4-5	51,61	77,60		751,79	
5	5-1	46,17	2,29	2,345	24,8	25,32
	5-2	46,43	2,40		25,84	
6	6-1	44,48	1,96	1,995	22,03	22,275
	6-2	45,06	2,03		22,52	
7	7-1	44,70	1,48	1,515	16,55	17,0
	7-2	44,42	1,55		17,45	
8	8-1	41,30	1,39	1,41	16,83	16,95
	8-2	41,30	1,43		17,07	

Бидејќи секој од осумте експерименти е реплициран, потребно е да се определи дисперзијата на истите. Пресметувањето на дисперзијата се направи според следната равенка:

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

За првиот експеримент одзивите се 895,36 и 765,19, а нивната средна вредност 850,275, па варијансата односно дисперзијата ќе биде:

$$S_1^2 = \frac{1}{2-1} \sum_{i=1}^2 (895,36 - 850,275)^2 + (765,19 - 850,275)^2 = 8472,114$$

На сличен начин е пресметана дисперзијата и за останатите тестови. Резултатите пресметките на дисперзијата се дадени во табелата 7.2.

Табела 7.2. Резултати од пресметките на дисперзијата

Експеримент	y_{j1}	y_{j2}	\bar{y}_j	S_j^2
1	895,36	765,19	830,275	8472,11445
2	827,7	733,2	780,465	4462,29045
3	898,36	851,92	875,14	1078,3368
4	699,9	751,79	725,845	1346,28605
5	24,8	25,84	25,32	0,5408
6	22,03	22,52	22,275	0,12005
7	16,55	17,45	17	0,405
8	16,83	17,07	16,95	0,0288

Средната вредност на дисперзијата е пресметана според равенката:

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

Односно:

$$S_j^2 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 8472,11445 + 4462,29045 + 1078,3368 + 1346,28605 + 0,5408 + 0,12005 + 0,405 + 0,0288 = 1920,015$$

Сега можеме да го пресметаме Кохреновиот критериум односно за проверка на пресметките за експериментите се наоѓа односот на секоја проценка на дисперзијата и сумата од сите проценки на дисперзијата:

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

Најголемата дисперзија ($\max S_j^2$) изнесува 8472,11445, па ако замениме во равенката ќе добиеме:

$$G_p = \frac{8472,11445}{1536012} = 0,55156564$$

G_p - претставува пресметана вредност на Критериумот на Кохерен и се споредува со табеларната вредност на Кохерен, $G_{\alpha, f, N}$ во зависност од нивото на значајност α , 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 нашите пресметки допуштаме само 5 % грешка или сметаме дека добиените резултати се пресметани со точност од 95%.

Редот на дисперзии се смета за хомоген ако:

$$G_{пресм.} \leq G_{\alpha, f, N}$$

Според критични вредности за горно 0,05 ниво на значајност или $P = 0,95$ Кохренов критериум $G_{\alpha, f, N} = 0,6798$, што значи дека е исполнет горенаведениот услов.

Исполнувањето на горенаведениот услов укажува на репродуцибилност на експериментите, а проценката за дисперзијата е хомогена.

После пресметките на дисперзијата на експериментите, врз основа на полниот факторен експеримент потребно е да се пресметаат регресионите коефициенти: $(\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}, \beta_{123})$. Некои коефициенти можат да се покажат занемарливо мали – незначајни. Определувањето на значјноста на регресионите коефициенти се врши со помош на Студентовиот (Student) критериум. За да се утврди дали тие се значајни или не, пред се, треба да се процени варијансата при која тие се определуваат.

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

$$S_{\beta} = \sqrt{\frac{1920,015}{8}} = 15,49199$$

Треба да се напомене дека 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:

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

Односно апсолутната вредност на коефициентот на регресија да е поголем во однос на табличната вредност на Студентовиот критериум.

t – табеларна вредност на Студентовиот (Student) критериум која 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 да не е задоволен критериумот, тогаш коефициентот на регресија се изостава како незначаен т.е. невлијателен коефициент во регресионата равенка.

За нашиот експеримент :

$$|\beta| \geq S_{\beta}t \geq 15,49199 \cdot 2,31 \geq 35,7865$$

што значи, секој коефициент по апсолутна вредност треба да биде поголем од или еднаков на 35,7865, но претходно треба да ги пресметаме вредностите на секој коефициент од равенката 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 β_0 претставува средна вредност од сите одзиви (\bar{y}):

$$\beta_0 = \frac{830,275 + 780,465 + 875,14 + 725,8452532 + 22,275 + 17 + 16,95}{8} = 411,6599$$

Останатите коефициенти од равенката се пресметуваат преку следните равенки:

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

каде што: X_{ij} – претставуваат кодираните вредности на коефициентите X_i .

За да се определат кодираните вредности на факторите прво се составува табела од комбинации на варијаблите во експериментот и границите на нивното варирање (максимална и минимална граница). Овие кодирани вредности ни се потребни за да можеме да го определиме знакот пред коефициентите (β_i). Тие се пресметуваат по формулата:

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

X_i – е реална променлива;

X_{i_0} – средната вредност на границите на варирање;

ΔX_i – интервалот на промена на границите на варирање.

За да знаеме дека точно сме ги пресметале кодираните вредности на факторите, треба да имаме во предвид дека, кога работиме со максималната граница на променливата коефициентот x_i секогаш добива вредност +1, додека кога се работи со минималната граница на променливата тој добива вредност -1 (табела 6. 4).

Во табела 7.3 се дадени пресметаните вредности на коефициентите β_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 35,7865 односно се незначајни за експериментирањето и може да се изостават во регресионата равенка т.е. во равенката за модел од прв ред со три фактори.

Табела 7.3. Резултати од пресметките на вредностите на коефициентите, β_i

N	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	\bar{y}
1	1	1	1	1	1	1	1	1	830,275
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	780,465
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	875,14
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	725,845
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	25,32
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	22,275
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	17
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	16,95

β_0	β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}	β_{23}	β_{123}
411,6599	25,2739	2,9239	391,274	-12,060	24,5001	-0,4874	-12,8089

Според тоа регресивната равенка со кодирани променливи ќе биде:

$$y = 411,6599 + 25,2749x_1 + 2,9239x_2 + 391,274x_3 - 12,060x_1x_2 + 24,5001x_1x_3 - 0,4874x_2x_3 - 12,8089x_1x_2x_3$$

Од регресионата равенка може да се забележи дека само агол на намотување како процесен параметар X₃ влијае на јачината на истегнување. Влијанието на другите два фактори: брзина на намотување и тензија на влакната влијаат безначајно на јачината на истегнување, а исто така не постои интеракција меѓу факторите. Доколку се занемарат т.е. изостават како незначајни коефициенти, регресионата равенка т.е. равенката за моделот од прв ред со три фактори ќе биде:

$$y = 411,6599 + 391,274x_3$$

Од резултатите прикажани во табела 7.1 може да се забележи дека примероците од 1 до 4 покажаа најдобри резултати за јачина на истегнување. Овие примероци беа намотани со агол од 90⁰. Додека, примероците од 5 до 8 добиени со агол на намотување од 10⁰ покажаа многу пониска вредност за јачина на истегнување и тоа за повеќе од десет пати. Од добиените резултати може да се забележи дека својства на композитните примероци зависат генерално од аголот на намотување на влакната. Имено, поголемиот агол на намотување доведува до поголема јачина на истегнување кај композитните цевки. Исто така, може да се забележи дека тензијата на влакна и брзината на намотување на влакната многу малку влијаат на јачината на истегнување на примероците.

Добиената регресиона равенка укажува на истиот заклучок.

На слика може да се видат испитаните примероци и начинот на нивна деструкција после тестирањето.



Слика 7.1. Приказ на деструктурирани примероци со различен агол на намотување после испитувањето на јачина на истегнување: а) примерок со најмала јачина на истегнување и агол на намотување 10^0 , б) примерок со најголема јачина на истегнување и агол на намотување 90^0

Може да се забележи дека постои различна деструкција кај примероците со различен агол на намотување. Имено, кај примероците со агол на намотување од 90^0 силата на истегнување делува во правец на влакната и затоа отпорот е поголем односно јачината е поголема и зависи од јачината на влакната. Додека, кај примероците со агол на намотување од 10^0 силата на истегнување делува нормално на намотаните влакна и отпорот е помал односно јачината е помала.

7.2. Проверка на моделот односно адекватноста на регресионата равенка

После определување на регресионата равенка на основа на пресметаните коефициенти и испитана нивната валидност, беше испитана нејзината адекватност односно беше проверена нејзината подобност/ способност за правилно опишување на функцијата на одзив. Таа проверка се направи со помош на критериумот на Фишер (Fisher). Равенката е адекватна ако е исполнет условот:

$$F_p \leq F_t$$

$$F_p = \frac{s_{ad}^2}{s_j^2}$$

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - y_j)^2}{N - k - 1}$$

Во оваа равенка y_j ги означува вредностите на одзивот пресметани според регресивната равенка. На пример, за првата серија, ако ги замениме вредностите за кодираните фактори се добива:

$$y_1 = 414,1599 + 393,774 \cdot 1 = 807,93$$

$$y_2 = 414,1599 + 393,774 \cdot 1 = 807,93$$

$$y_3 = 414,1599 + 393,774 \cdot 1 = 807,93$$

$$y_4 = 414,1599 + 393,774 \cdot 1 = 807,93$$

$$y_5 = 414,1599 + 393,774 \cdot (-1) = 20,39$$

$$y_6 = 414,1599 + 393,774 \cdot (-1) = 20,39$$

$$y_7 = 414,1599 + 393,774 \cdot (-1) = 20,39$$

$$y_8 = 414,1599 + 393,774 \cdot (-1) = 20,39$$

Ова се вредностите на одзивот што беа добиени од моделот со замена на соодветните вредности на варијаблите , +1 и -1, т.е. со нивните вредности кога се на долно и горно ниво, соодветно. Во табела III.4 напредно се дадени вредностите добиени од експериментот \bar{y}_j со вредностите добиени од моделот, y_j .

Табела 7.4. Резултати добиени од експериментот \bar{y}_j и од моделот y_j

Експеримент	\bar{y}_j	y_j	$(\bar{y}_j - y_j)$	$(\bar{y}_j - y_j)^2$
1	830,275	807,93	22,345	499,299
2	780,465	807,93	-27,465	754,326225
3	875,14	807,93	67,210	4517,1841
4	725,854	807,93	-82,076	6736,469776
5	25,32	20,39	4,930	24,3049
6	22,275	20,39	1,885	3,553225
7	17	20,39	-3,390	11,4921
8	16,95	20,39	-3,440	11,8336

Потоа беше определена сумата на сите вредностите во последната колона:

$$\sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - y_j)^2 = 12558,46295$$

Бројот на степените на слобода е:

$$N - k - 1 = 8 - 2 - 1 = 5$$

од тука следува дека:

$$s_{ad}^2 = \frac{12558,46295}{5} = 2511,69259$$

Претходно пресметавме дека:

$$s_j^2 = 1920,015$$

$$F_p = \frac{2511,693}{1920,015} = 1,308163$$

Табеларната вредност на Фишеровиот критериум за $P = 0,95$, $f = 5$ и $N=8$ изнесува 3,69, и бидејќи е задоволен условот:

$$F_p \leq F_t$$

заклучивме дека моделот е адекватен.

Со тоа се заклучува дека моделот на експериментот:

$$y = 411,6599 + 25,2749x_1 + 2,9239x_2 + 391,274x_3 - 12,060x_1x_2 + 24,5001x_1x_3 - 0,4874x_2x_3 - 12,8089x_1x_2x_3$$

или

$$y = 411,6599 + 391,274x_3$$

сосема добро го објаснува процесот.

7.3. Одредување на моделот во инженерски единици

Во продолжение направена е конверзија на регресионата равенка од кодирани во инженерски варијабли. За да се добие одзивот во вистинските единици потребно е да се изврши конвертирање на кодираните варијабли во инженерски или натурални варијабли во регресионата равенка:

$$y = 411,6599 + 391,274x_3$$

Преку следната релацијата направено е претворање на варијаблите од еден вид во друг:

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

Каде што:

X – инженериска варијабла (фактор),

X_0 – средното ниво на инженериската варијабла,

ΔX – интервалот на промена на X ,

x – кодирана варијабла.

За секој од трите фактори извршена е соодветна замена на кодираните фактори (мало x) во инженериски (големо X) според следниве релации:

$$x_1 = \frac{X_1 - 13,125}{7,875}; \quad x_2 = \frac{X_2 - 87}{23}; \quad x_3 = \frac{X_3 - 50}{40};$$

Основно ниво	$X_1 = 13,125$	$X_2 = 87$	$X_3 = 50$
Интервал на варијација	7,875	23	40
Горно ниво	5,25	64	10
Долно ниво	21	110	90

Потоа, во равенката со кодирани фактори извршена е замена и добиена е равенка во инженериски единици:

$$y = 411,6599 + 391,274 \frac{X_3 - 50}{40}$$

$$y = 9,78185 \cdot X_3 - 77,4326$$

Ако во оваа равенка замениме било која вредност за факторите во инженериски единици и тоа во опсегот што е предмет на испитување, ќе го добиеме одзивот т.е. ќе добиеме вредност за испитуваната карактеристика без притоа да правиме експеримент.

На овој начин може да се заклучи дека преку дизајнирањето на процесот и добивањето на регресионата равенка со кодирани варијабли како и преку равенка во инженериски единици, овозможено е добивање на максимален број на информации при минимален број на проби.

7.4. Добиени резултати од техничко технолошката и економската анализа на различни типови композитни цевки

Со примена на софтверскиот пакет Hoffman Engineering беа направени анализи за издржливост на шест различно дизајнирани композитни цевки на висок внатрешен притисок. Имено, при дизајнирање на овие композитни цевки како променливи параметри беа типовите на материјалите т.е. зајакнувачките влакна и аголот на

намотување на влакната, додека должината и дијаметарот беа исти за шест композитни цевки. Од добиената регресионата равенка беше заклучено дека аголот на намотување како процесен параметар најмногу влијае на јачината на истегнување. Затоа и во анализираните композитни цевки со помош на софтверскиот пакет Hoffman Engineering беше направена анализа на композитни цевки со различен аголот на намотување на влакната како во предходните лабораториски експерименти (10° и 90° степени). Прозорот со резултатите после завршените калкулации во користената софтверска апликација се прикажани на следната слика 7.2

Loads	
Bending Moment	0 Nmm Stresses: 0/0 MPa
Normal Force	0 N Stress: 0 MPa
Torsional Moment	0 Nmm Stress: 0 MPa
Shear Force	0 N Stress: 0 MPa
Internal Pressure	94,59 Bar Stress: 68/140 MPa
Rotating velocity	0 RPM Stress: 0 MPa Load carrying <input checked="" type="checkbox"/>
Critical bending moment (Brazier Effect)	12.985.935 Nmm
Critical external Pressure (Brazier Effect)	10,3 Bar (-919,1%)
Critical torque (Brazier Effect)	6.665.660 Nmm
Failure Criteria	<input type="radio"/> Puck <input type="radio"/> Maximum Stress <input type="radio"/> Tsai-Hill <input checked="" type="radio"/> Tsai-Wu <input type="radio"/> Fiber Failure

а) композитна цевка тип 1-1

Loads	
Bending Moment	0 Nmm Stresses: 0/0 MPa
Normal Force	0 N Stress: 0 MPa
Torsional Moment	0 Nmm Stress: 0 MPa
Shear Force	0 N Stress: 0 MPa
Internal Pressure	175,82 Bar Stress: 128/264 MPa
Rotating velocity	0 RPM Stress: 0 MPa Load carrying <input checked="" type="checkbox"/>
Critical bending moment (Brazier Effect)	15.993.046 Nmm
Critical external Pressure (Brazier Effect)	15,3 Bar (-1152,7%)
Critical torque (Brazier Effect)	7.525.912 Nmm
Failure Criteria	<input type="radio"/> Puck <input type="radio"/> Maximum Stress <input type="radio"/> Tsai-Hill <input checked="" type="radio"/> Tsai-Wu <input type="radio"/> Fiber Failure

б) композитна цевка тип 1-2

Loads		
Bending Moment	0	Nmm Stresses: 0/0 MPa
Normal Force	0	N Stress: 0 MPa
Torsional Moment	0	Nmm Stress: 0 MPa
Shear Force	0	N Stress: 0 MPa
Internal Pressure	196,9	Bar Stress: 147/303 MPa
Rotating velocity	0	RPM Stress: 0 MPa Load carrying <input checked="" type="checkbox"/>
Critical bending moment (Brazier Effect)	18.507.847 Nmm	
Critical external Pressure (Brazier Effect)	93,7 Bar (-212,2%)	
Critical torque (Brazier Effect)	7.999.482 Nmm	
Failure Criteria	<input type="radio"/> Puck <input type="radio"/> Maximum Stress <input type="radio"/> Tsai-Hill <input checked="" type="radio"/> Tsai-Wu <input type="radio"/> Fiber Failure	

в) КОМПОЗИТНА ЦЕВКА ТИП 1-3

Loads		
Bending Moment	0	Nmm Stresses: 0/0 MPa
Normal Force	0	N Stress: 0 MPa
Torsional Moment	0	Nmm Stress: 0 MPa
Shear Force	0	N Stress: 0 MPa
Internal Pressure	217,38	Bar Stress: 158/327 MPa
Rotating velocity	0	RPM Stress: 0 MPa Load carrying <input checked="" type="checkbox"/>
Critical bending moment (Brazier Effect)	11.658.578 Nmm	
Critical external Pressure (Brazier Effect)	10,8 Bar (-2022,1%)	
Critical torque (Brazier Effect)	7.152.228 Nmm	
Failure Criteria	<input type="radio"/> Puck <input type="radio"/> Maximum Stress <input type="radio"/> Tsai-Hill <input checked="" type="radio"/> Tsai-Wu <input type="radio"/> Fiber Failure	

г) КОМПОЗИТНА ЦЕВКА ТИП 2-1

Loads		
Bending Moment	0	Nmm Stresses: 0/0 MPa
Normal Force	0	N Stress: 0 MPa
Torsional Moment	0	Nmm Stress: 0 MPa
Shear Force	0	N Stress: 0 MPa
Internal Pressure	314,11	Bar Stress: 243/501 MPa
Rotating velocity	0	RPM Stress: 0 MPa Load carrying <input checked="" type="checkbox"/>
Critical bending moment (Brazier Effect)	15.962.207 Nmm	
Critical external Pressure (Brazier Effect)	14,2 Bar (-2208,2%)	
Critical torque (Brazier Effect)	9.623.766 Nmm	
Failure Criteria	<input type="radio"/> Puck <input type="radio"/> Maximum Stress <input type="radio"/> Tsai-Hill <input checked="" type="radio"/> Tsai-Wu <input type="radio"/> Fiber Failure	

д) КОМПОЗИТНА ЦЕВКА ТИП 2-2

Loads		
Bending Moment	0	Nmm Stresses: 0/0 MPa
Normal Force	0	N Stress: 0 MPa
Torsional Moment	0	Nmm Stress: 0 MPa
Shear Force	0	N Stress: 0 MPa
Internal Pressure	423,63	Bar Stress: 317/654 MPa
Rotating velocity	0	RPM Stress: 0 MPa Load carrying <input type="checkbox"/>
Critical bending moment (Brazier Effect)	23.816.019 Nmm	
Critical external Pressure (Brazier Effect)	23,5 Bar (-1803,3%)	
Critical torque (Brazier Effect)	15.289.891 Nmm	
Failure Criteria	<input type="radio"/> Puck <input type="radio"/> Maximum Stress <input type="radio"/> Tsai-Hill <input type="radio"/> Tsai-Wu <input type="radio"/> Fiber Failure	

ѓ) КОМПЗИТНА ЦЕВКА ТИП 2-3

Слика 7.2. Резултати од пресметката и анализата на разни типови композитни цевки

После извршените пресметки, крајните резултати од анализата за внатрешниот притисок на разрушување на шест типови композитни цевки кои се предмет на анализа во оваа магистерска работа, се прикажани во Табела 7.5.

Од Табела 7.5 може да се види дека сите композитни цевки го задоволуваат барањето согласно на стандардот ISO 11439.2000 [29] освен типот 1-1 кај кој аголот на намотување на влакната е 10° , а типот на влакна: стаклени. Овој податок е во корелација со претходно добиената регресиона равенка и укажува на тоа дека аголот на намотување најмногу влијае на издржливоста на композитните цевки на висок притисок. Имено, композитните цевки добиени со агол на намотување на влакна од 90° покажуваат многу поголеми внатрешни притисоци на разрушување. Кога се анализира типот на влакната тогаш може да се заклучи дека композитните цевки добиени со јаглеродни влакна покажуваат многу повисока вредност на внатрешен притисок на разрушување од композитните цевки намотани со стаклени влакна. Затоа, кај овие композитни цевки може слободно да се намали бројот на слоевите и со тоа се намалува и дебелината на композитниот ѕид и тежината на композитната цевка, а притоа пак да се задоволи барањето од стандардот. Композитните цевки добиени од хибриден материјал: стаклени и јаглеродни влакна, покажуваат малку помали внатрешни притисоци на издржливост во споредба со композитните цевки врз основа на

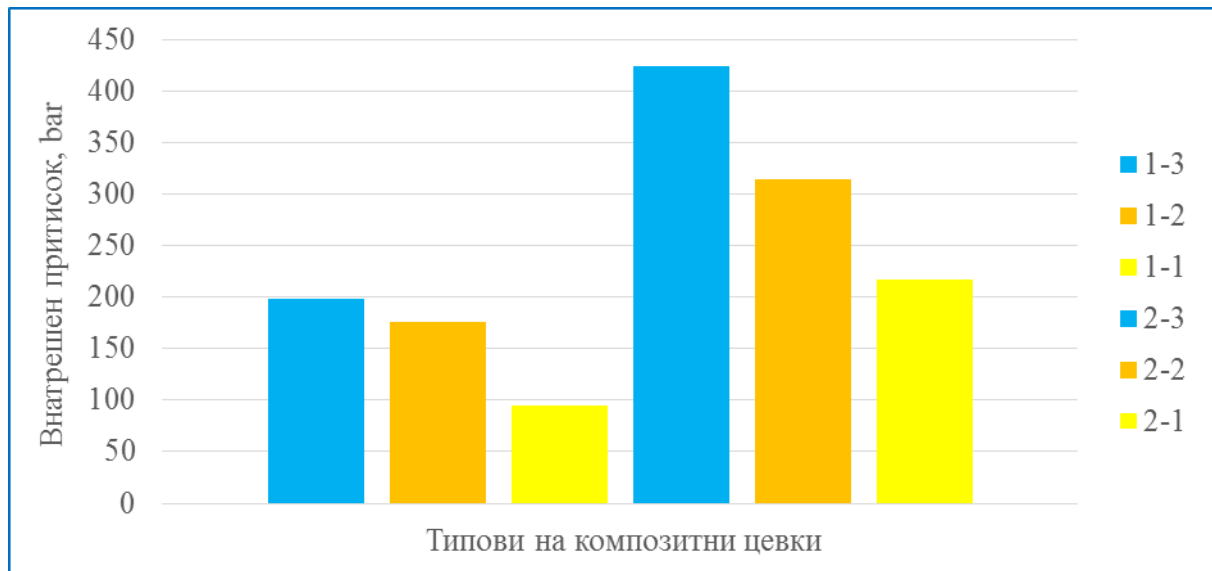
јаглеродни влакна но, повисоки од оние врз основа на стаклени влакна. Исто така и кај овие композитни цевки може да се направи редуцирање на слоевите и намалување на дебелината и тежината на композитната цевка. Меѓутоа, кај сите анализирани цевки со агол на намотување на влакната од 10° забележан е помал внатрешен притисок на разрушување во споредба со цевките со агол на намотување на влакната од 90°. За да може типот композитна цевка 1-1 да го исполни барањето на стандардот потребно е да се додадат уште слоеви што пак ќе резултира во зголемување на дебелината и тежината. Направените анализи укажуваат на истиот заклучок од претходното дизајнирање на експериментите и добиената регресиона равенка, а тоа е дека оптимални резултати би се добиле за композитни цевки со агол на намотување на влакната поголем од 10°, а помал од 90°. Се очекува дека композитни цевки со оптимални карактеристики би биле кога аголот на намотување е околу 50°.

Табела 7.5. Резултати од пресметан внатрешен притисок на издржливост на шест типови композитни цевки

Тип композитна цевка	Пресметан внатрешен притисок на разрушување (bar)	Минимален притисок на разрушување согласно ISO 11439.2000 (bar)	Оценка за задоволување на барања од Стандард
1-1	94,59	180	Не исполнува
1-2	175,82	148	Исполнува
1-3	198,9	117	Исполнува
2-1	217,38	117	Исполнува
2-2	314,41	180	Исполнува
2-3	423,63	180	Исполнува

На слика 7.3 графички се преставени шесте типови на композитни цевки во однос на внатрешните притисоци на разрушување. Како што може да се види од графикот, композитните цевки со ист агол на намотување 10°, иста дебелина и исти димензии но, конституирани со различни зајакнувачки влакна (1-1, 1-2, 1-3) покажуваат различен

внатрешен притисок. Композитната цевка врз основа на јаглеродни влакна (1-3) покажува најголем внатрешен притисок, помал внатрешен притисок покажа композитната цевка врз основа на хибриден материјал: стаклени и јаглеродни влакна (1-2) додека, најмала вредност за внатрешниот притисок покажа композитната цевка со стаклени влакна (1-1).



Слика 7.3. Влијание на типот на материјалот и аголот на намотување врз внатрешниот притисок на композитните цевки

Причината за помалата издржливост на композитната цевка тип 1-1 на високи внатрешни притисоци се должи на помалите механички карактеристики на стаклените влакна од една страна како и на аголот на намотување на влакната од друга страна. Кај овој тип композитна цевка влакната се во лонгитудинален правец, а напрегањата во внатрешноста на цевката се во радијален правец. Тоа значи дека не е искористена ефикасноста на зајакнувачките влакна намотани под агол од 10° . Всушност отпорноста на внатрешниот притисок на разрушување кај овој тип на композитна цевка се должи на јачината на матрицата и на бројот на слоеви во композитниот сид.

Графичкиот приказ на сликата 7.3. дава добра и јасна слика за влијанието на дизајнот на цевката врз механичките карактеристики поконкретно во овој случај врз внатрешниот притисок на разрушување. Композитните цевки добиени со агол на намотување на влакната од 90° со иста дебелина и тежина имаат два пати поголема вредност за внатрешниот притисок на разрушување (композитни цевки тип 2-1, 2-2, 2-

3) од исто такви типови композитни цевки добиени со агол на намотување на влакната од 10° (тип 1-1, 1-2, 1-3).

Во табела 7.6. дадени се типовите композитни цевки со составните конституенти изразени во тежински проценти и во килограми, како и цената на парче композитна цевка од секој тип пооделно. При пресметка на цената на чинење на типовите композитни цевки земени се следните цени на материјалите:

Цена на чинење на стаклени влакна = 1,75 euro/kg

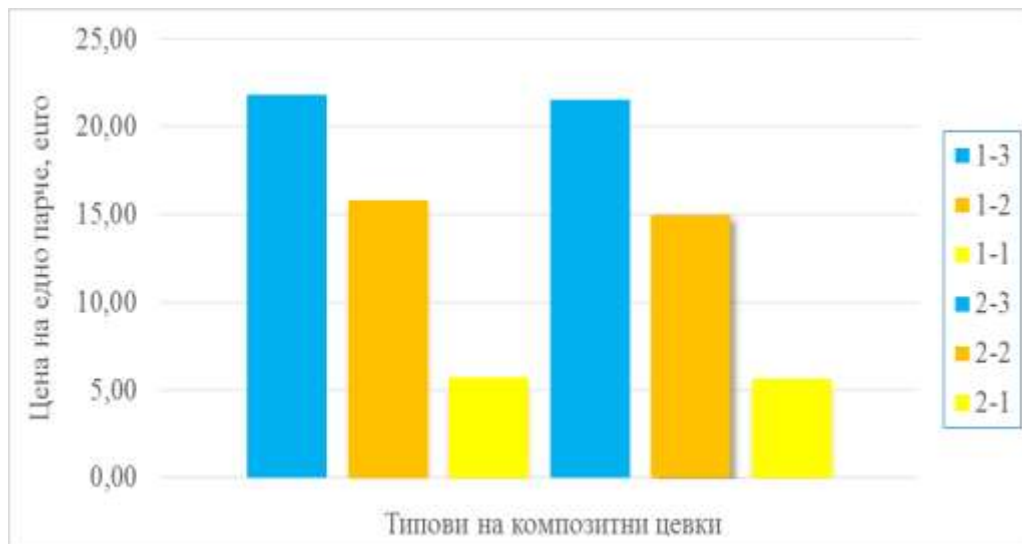
Цена на чинење на јаглородни влакна = 18 euro/kg

Цена на чинење на епоксидна смола = 5 euro/kg

Табела 7.6. Цена на чинење на единица парче – композитна цевка

Композитни цевки: $ID = 100\text{ mm}$, $L = 1000\text{ mm}$, $d = 3\text{ mm}$								
Тип комп. цевка	Стакл. вл., % теж.	Јаглер. вл., % теж.	Епоксид. Смола, % теж.	m комп. цевка, kg	m стакл. вл., kg	m јаглер. вл., kg	m епок. см., kg	Единечна цена / комп. цевка, euro
1-1	72,8	0	27,2	2,173	1,581944	0	0,591056	5,72
1-2	34,375	34,375	31,25	1,898	0,652438	0,652438	0,593125	15,85
1-3	0	64,7	35,3	1,63	0	1,05461	0,57539	21,86
2-1	72,8	0	27,2	2,145	1,56156	0	0,58344	5,65
2-2	34,375	34,375	31,25	1,797	0,617719	0,617719	0,561563	15,01
2-3	0	64,7	35,3	1,605	0	1,038435	0,566565	21,52

На следната слика 7.4 графички е претставена единечната цена на шесте типови композитни цевки.

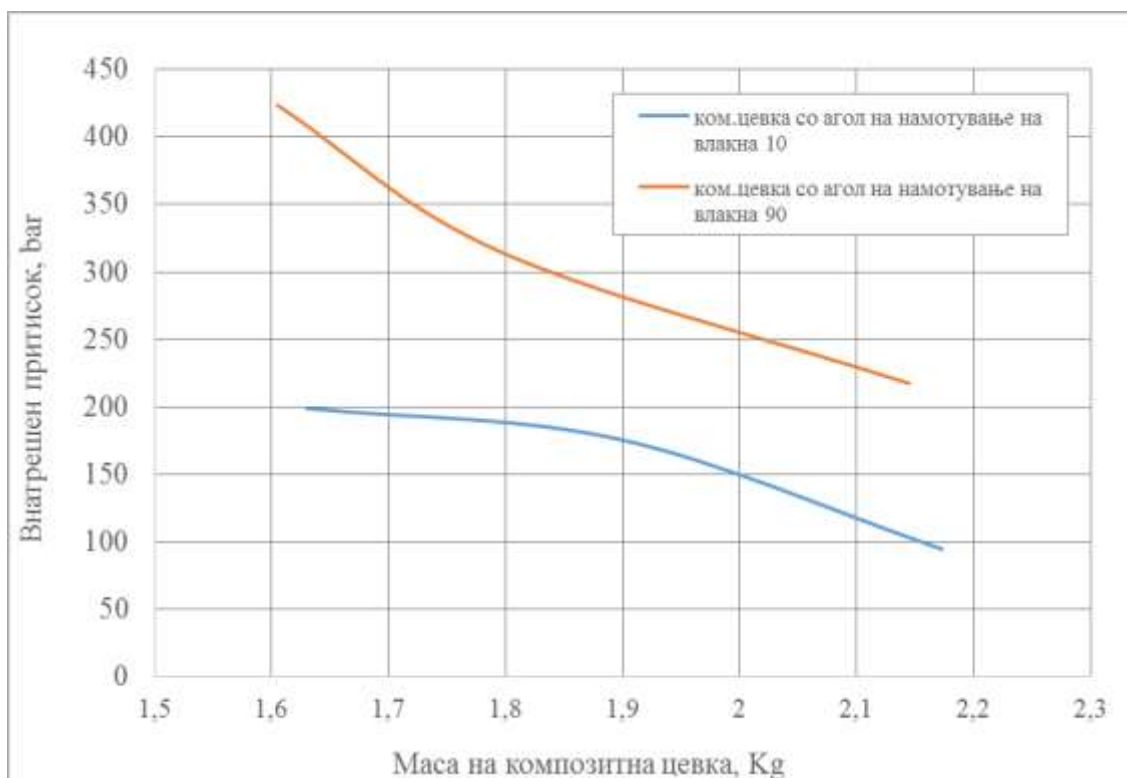


Слика 7.4. Цена на едно парче на композитна цевка (100x1000x3mm) за сите типови на композитни цевки

Како што се гледа од дијаграмот типот на композитни цевки 1-3 и 2-3 кои имаат најдобри механички карактеристики односно најголем внатрешен притисок имаат приближно иста и највисока цена. Меѓутоа, тие композитни цевки врз основа на јаглеродни влакна имаат најмала тежина во споредба со останатите. Но, ако се споредат композитните цевки тип 1-1 и 2-1 исто така може да се забележи дека цената е приближно иста, но постои разлика во нивната издржливост на внатрешен притисок. Композитната цевка тип 2-1 покажа два пати поголем внатрешен притисок во споредба со типот 1-1. Истото тоа се забележува кога ќе се споредат типовите композитни цевки 1-2 со 2-2 или типовите 1-3 со 2-3. Повторно тоа укажува на заклучокот дека аголот на намотување најмногу влијае на јачината на композитните цевки. Конкретно за издржливоста на композитните цевки на висок внатрешен притисок најдобра отпорност покажуваат композитните цевки намотани со влакна под агол од 90°. Меѓутоа, композитните цевки намотано со стаклени влакна имаа поголема тежина во споредба со композитните цевки врз основа на јаглеродни влакна. Имено, композитна цевка со исти димензии, иста дебелина и ист агол на намотување на влакна, но врз основа на различни влакна покажуваат различна тежина и издржливост на внатрешен притисок. Композитните цевки врз основа на јаглеродни влакна се полесни за околу 40% од исти такви цевки врз основа на стаклени влакна, но се издржливи на високи притисоци за повеќе од два пати споредено со тие врз основа на стаклени влакна. Затоа, кај композитните цевки врз основа на јаглеродни влакна може да се направи редуцирање

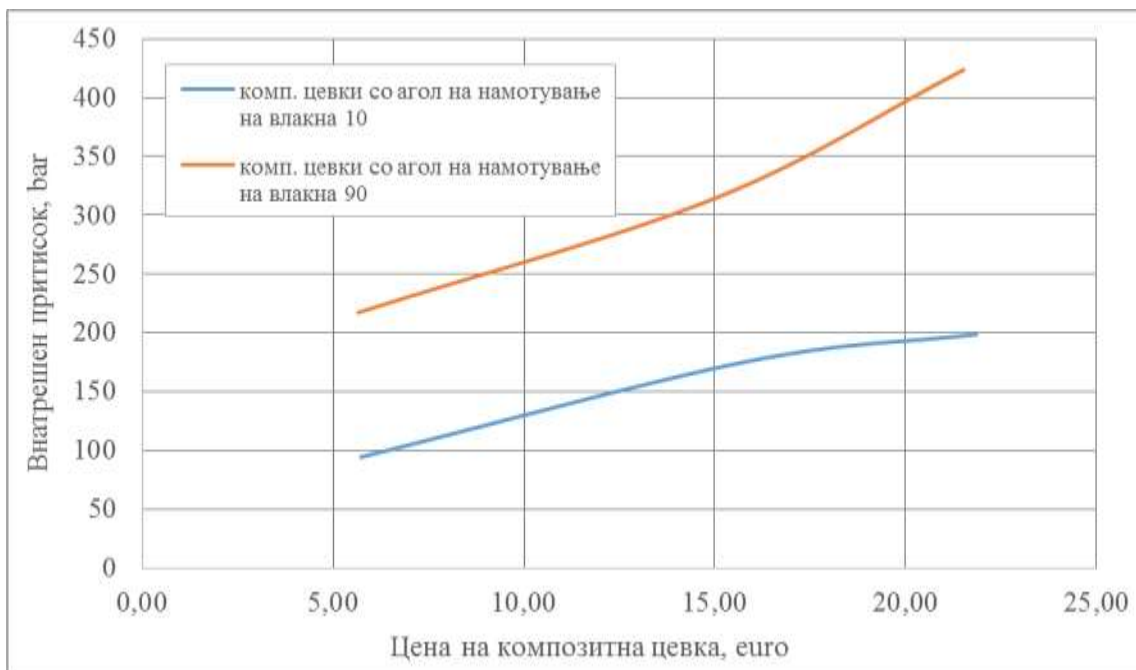
на слоевите што ќе доведе до редуцирање на цената и тежината, а притоа повторно цевките да го задоволат стандардот за издржливост на високи внатрешни притисоци. Една од најголемите предности на композитните цевки е тоа што може да се направи редуцирање на тежината, а со тоа и на цената и повторно да се обезбеди издржливост на високи внатрешни притисоци.

На слика 7.5 графички е претставена масата на композитните цевки намотани под агол од 10° (тип 1-1, 1-2, 1-3) и под агол од 90° (тип 2-1, 2-2, 2-3) во однос на нивниот внатрешниот притисок изразен во бари.



Слика 7.5. Маса на композитни цевки во однос на нивната издржливост на внатрешен притисок

Од сликата 7.5. јасно се гледа дека композитните цевки со иста маса, а добиени со различен агол на намотување на влакната покажуваат различна отпорност на внатрешен притисок. Композитните цевки тип 2-1, 2-2, 2-3 намотани со влакна со агол 90° имаат многу поголема отпорност на внатрешен притисок.



Слика 7.6. Цена на композитни цевки во однос на нивната издржливост на внатрешен притисок

Од добиените криви на слика 7.6. може јасно да се види дека композитна цевка со иста цена, а различен агол на намотување на влакна има различна отпорност на внатрешен притисок. Имено, композитната цевка добиена со агол на намотување на влакната од 90° , а која има иста цена со композитна цевка добиена од ист материјал но, со агол на намотување на влакната од 10° , има многу поголема отпорност на внатрешен притисок. Тоа укажува дека дизајнот на композитната цевка може да резултира во многу добри и поекономични цевки, а притоа полесни за транспорт на флуид. Предноста кај композитните цевки споредено со конвенционалните метални или челични за истата намена е во тоа што, композитните цевки може да се дизајнираат да бидат многу полесни и притоа исто или повеќе отпорни на високи внатрешни притисоци.

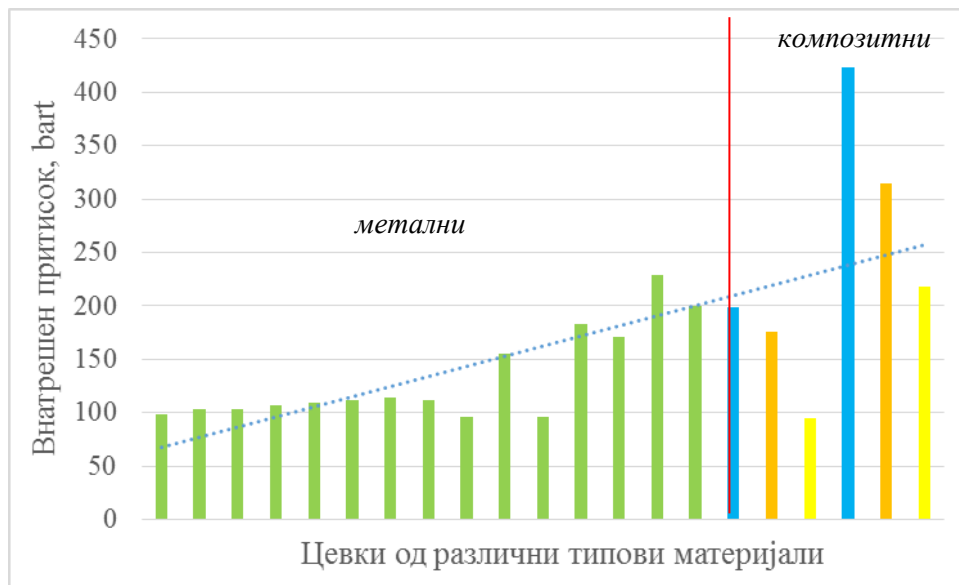
Во рамките на оваа магистерска работа направена е споредба на разни типови композитни цевки со метални цевки од прохром (кои се најчесто употребувани) за иста намена. Споредена е нивната отпорност на висок внатрешен притисок како и нивната цена на чинење.

Во Табела 7.7 дадена е отпорноста на внатрешен притисок за разни типови метални цевки со исти димензии како претходно разгледуваните типови на композитни цевки: должина $L = 1000 \text{ mm}$ и дебелина $d = 4 \text{ mm}$. Податоците за отпорноста на внатрешен притисок на металните цевки се земени од литература [30]. Разгледуваните метални цевки имаат маса од 10,719 Kg додека нивната цена за единица парче метална цевка изнесува 42, 87 Euro. При пресметка на цената на чинење на различните метални цевки од прохром земена е средна цена на метал прохром = 4 euro/kg.

Табела 7.7. Внатрешен притисок на метални цевки

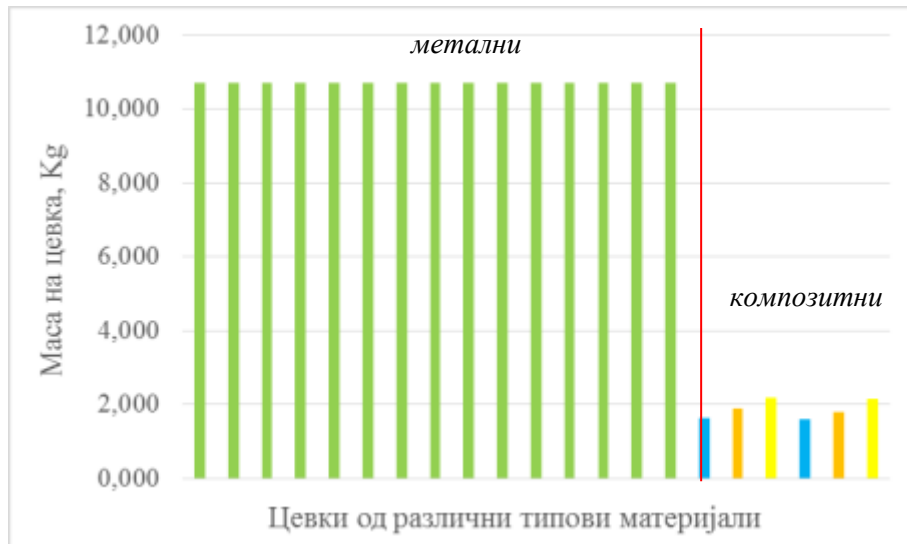
Вид на метални цевки прохромски (<i>stainless steel</i>)	Внатрешен притисок, bar
EN 1.4306	98
EN 1.4435	103
EN 1.4404	103
EN 1.4541	107
EN 1.4550	109
EN 1.4571	112
EN 1.4539	114
EN 1.4563	112
EN 1.4335	96
EN 1.4466	155
EN 1.4547	96
EN 1.4558	183
EN 1.4462	171
EN 1.4410	229
EN 1.4424	200

На слика 7.7 претставена е отпорноста на внатрешен притисок на разни типови метални и композитни цевки.



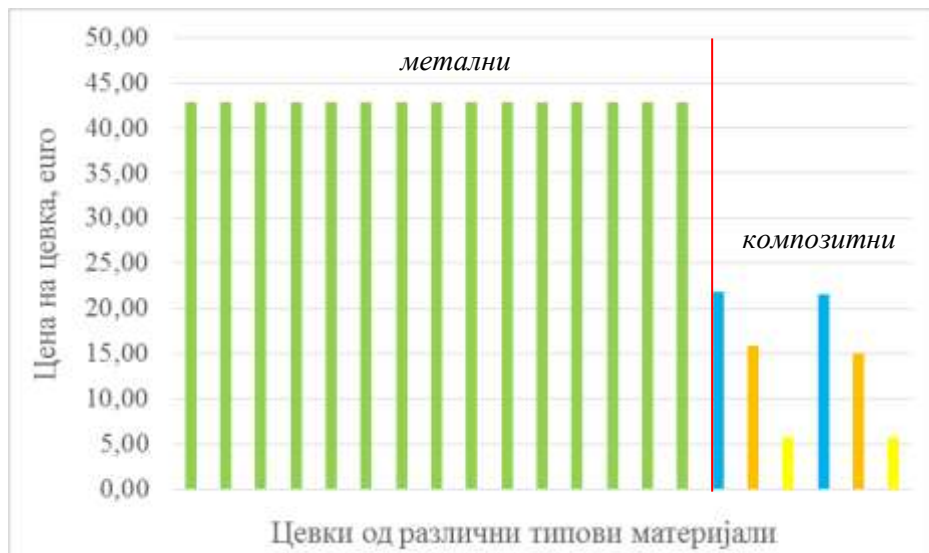
Слика 7.7. Отпорност на внатрешен притисок на разни типови метални и композитни цевки

Може да се забележи дека отпорноста на внатрешен притисок на разни типови метални цевки е од 100 до 200 bar додека композитните цевки се издржливи на многу повисоки внатрешни притисоци до околу 450 bar. Отпорноста на внатрешен притисок на металните цевки е споредлива со таа на композитните цевки кои се добиени врз основа на стаклени влакна и тоа со агол на намотување од 10° . Композитните цевки врз основа на хибриден материјал, а особено тие врз основа на јаглородни влакна намотани под агол од 90° имаат повеќе од двојно повисока издржливост на внатрешен притисок во споредба со металните цевки. Од друга страна, композитните цевки имаат многу помала маса споредено со исти такви метални цевки. Оваа споредба јасно може да се види на слика 7.8. Тоа значи дека метална цевка која може да издржи внатрешен притисок од околу 200 bar има маса 10,719 kg додека композитна цевка која може да го издржи истиот притисок има маса од 2,145 kg. Ова претставува композитна цевка која е со најголема маса и е врз основа на стаклени влакна. Композитните цевки врз основа на хибридни влакна (стаклени + јаглородни) како и цевките врз основа на јаглородни влакна имаат уште помала маса 1,797 Kg и 1,605 Kg соодветно, а се издржливи на исти внатрешни притисоци од околу 200 bar. Тоа доведува до заклучок дека композитните цевки претставуваат добра замена за конвенционалните метални цевки за транспорт на флуиди.



Слика 7.8. Маса на разни типови метални и композитни цевки

Доколку се направи споредба на цената на чинење исто така се заклучува дека поисплатлива е примената на композитните цевки во споредба со конвенционалните метални цевки. Споредбено цената на разните типови метални и композитни цевки е дадена на слика 7.9.



Слика 7.9. Цена на разни типови на метални и композитни цевки

7.5. Примена на композитни цевки

Композитните цевки добиени со процес на намотување на влакна 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 на многу повисоки притисоци.

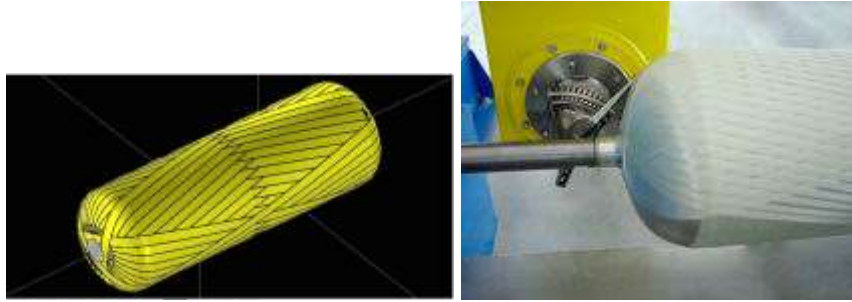
Примената на композитните цевки најчесто е за транспорт на флуиди, за резервоари и цистерни за хемикалии и гориво. Кој тип на композитни цевки ќе се применат зависи од тоа што се зема како услов. Доколку е потребно да се користат композитни цевки со мала маса и голема отпорност на внатрешен притисок тогаш потребно е да се применуваат тие врз основа на јаглеродни влакна или врз основа на хибридни материјали. Во случај кога масата не е критериум и не се бара многу голема отпорност на внатрешен притисок тогаш најсоодветно е да се применат композитни цевки врз основа на стаклени влакна како најдобра варијанта со ниска цена.

Композитните цевки се применуваат за т.н. ЛПГ и ЦНГ резервоари.

ЛПГ резервоарите кај нас се познати како резервоари за плин. Тоа всушност претставуваат резервоари за гас под висок притисок наменети за користење во домаќинствата. Но, се користат и како резервоари за гориво (гас) претежно во автомобилите и во другите возила како што се градски автобуси, камион и сл. Гасот под притисок во ЛПГ резервоарите е пропан-бутан. Името даоѓа од LPG – liquefied petroleum gas [31].

Покрај ЛПГ резервоарите во последно време се поголеми интерес во светот имаат и резервоарите под притисок за природен гас. Тие се викаат ЦНГ резервоари, име кое даоѓа од: compressed natural gas – CNG. Овие резервоари својата примена ја започнуваат како метални резервоари изработени од челик, но денес во светот се повеќе е присутна тенденција за замена на овие челични резервоари со композитни.

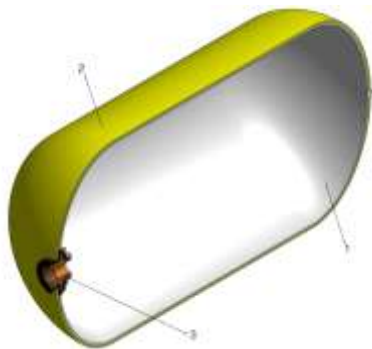
На следната Слика 7.10 прикажана е софтверска симулација и реално намотување на резервоар за гас под притисок. Композитните резервоари нудат повеќе предности во однос на челичните а тоа се: поголем рок на експлоатација, намалена тежина, отсуство на корозија, безбедност од експлозија при пожар и др. [32].



Слика 7.10. Намотување на резервоар за гас под притисок [32]

Најновите типови на резервоари за гас под притисок се изработуваат од термопластичен лајнер, форма на која се намотува композитниот материјал и формира композитна обвивка која всушност ги носи сите механички оптоварувања кои се јавуваат под дејство на вискиот притисок на гасот кој се наоѓа во резервоарите [33].

Шематското претставување на еден ваков резервоар (тип 4) е претставен на следната Слика 7.11.



Слика 7.11. Резервоар за гас под висок притисок (1-пластичен лајнер, 2-композит, 3-приклучок за вентил)

Композитните резервоари за гас под висок притисок имаат повеќе предности во споредба со челичните резервоари. Некои од основните предности се помалата тежина, отсуството на корозија, двојно подолг период на повторно тестирање, повисок степен на безбедност во присуство на оган и др. Сите овие предности не се секогаш доволни за пошироко распространување на овој тип на резервоари низ пазарите на светот. Посебно тоа е тешко на пазарите кои се сензитивни на цената на резервоарите, како што се на пример пазарите во Индија, Пакистан, Индонезија, Тајланд и други.

Заради цената на материјалот кој се користи во челичните резервоари како и начин на производство кое се стандардизирало и се одвива (во многу случаи) на стари производни линии кои се одамна амортизирани, цената на челичниот резервоар за гас под притисок е сеуште по-конкурентна во однос на композитниот. Но, ова доаѓа до израз доколку се прави само едноставна споредба на цена, без да се земат во обзир предностите на композитниот резервоар како и останатите повисоки трошоци на експлоатација на челичниот резервоар.

Композитните структури добиени со намотување на влакна се применуваат исто така и како лежиштата во повеќе индустрии. Најраспространети апликации за овие производи има во автомобилската, поморската и бродоградбена (marine and offshore) индустријата.

Овие производи се изработени од композитни материјали и истите се самоподмачкувачки, зајакнати со стаклени влакна. Се произведуваат со индустрискиот процес на намотување на влакна. Основниот материјал ја дава високата цврстина, додека лизгачкиот слој содржи специјални не-абразивни влакна и цврсти подмачкувачи кои обезбедуваат одлични триболошки карактеристики во влажни средини или во случај на гранични товари [34].



Слика 7.12. Примери на композитни лизгачки лежишта

Процесот на производство на овие композитни лежишта се состои од неколку главни технолошки чекори како што се процес на намотување, термичко процесирање и механичка обработка. Поради тоа што се работи за повеќеслојни материјали кои најчесто се состојат од два или повеќе слоеви од кои задолжителни се самоподмачкувачкиот слој и структурниот слој автоматизацијата на производството игра голема улога во задржување на постојан квалитет како и за постигнување на

економиката на производство со која овој производ може да изгради конкурентна позиција на пазарот.

Затоа, намалување на трошоците на производство преку повисок степен на автоматизација, кое секако е проследено со високо сериски производни капацитети, како и постојаноста на квалитетот и неговото автоматизирано следење во текот на целиот производен тек, согласно барањата на стандардите, е еден од моменталните правци во кои е насочен овој сегмент од индустријата за производство на композитни материјали.

8. ЗАКЛУЧОК

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

- Беше применета шест сигма DMAIC методологија за подобрување на индустрискиот процес – производство на композитни цевки.

- Со помош на применетата шест сигма DMAIC методологија беа дефинирани барањата за квалитет за композитните цевки односно нивна издржливост на високи внатрешни притисоци. Исто така, беа определени битните влезови кои влијаат на подобреното решение, а тоа се: конститутивните материјали на композитната структура, начинот на намотување на влакната, брзината на намотување, аголот на намотување, тензијата на влакната, вискозитетот на смолниот систем и друго. Беше определен стандардот за лабораториско тестирање на примероци (ASTM D2290) како и стандардот за реално испитување на композитни цевки за нивната отпорност на внатрешен притисок (ISO 11439.2000 - ASTM D1599).

- За подобрување на индустрискиот процес беше направено дизајнирање т.е. планирање на експериментите за индустрискиот процес – производство на композитни цевки 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 истегнување на лабораториски подготвени примероци – композитни прстени.

- Врз основа на добиените резултати од тестираната јачина на истегнување на примероците, 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 мало влијание и се безначајни.

- Беше направена проверка на моделот според Фишеровиот критериум односно беше определена адекватноста на равенката. Врз основа на направените пресметки беше заклучено дека моделот сосема добро го опишува процесот.

- Беше определен и модел во инженерски единици што овозможува за било која вредност за факторите во опсегот што е предмет на испитување, да се добие одзивот т.е. да се добие вредност за јачина на истегнување без притоа да се прави експеримент.

- Со помош на софтверскиот пакет Hoffman Engineering беше направена анализа на шест типови композитни цевки каде што како променливи параметри беа земени: конститутивните материјали и аголот на намотување на влакната.

- Од сите анализи беше добиен истиот заклучок дека отпорноста на висок внатрешен притисок на композитните цевки многу зависи од аголот на намотување на влакната и од типот на применетите влакна.

- Композитните цевки добиени со агол на намотување на влакната од 90° имаат два пати повисока отпорност на внатрешен притисок во споредба со композитните цевки добиени со агол на намотување на влакната од 10°.

- Композитните цевки врз основа на јаглородни влакна покажаа најголема отпорност на внатрешен притисок потоа следуваат композитните цевки врз основа на хибриден материјал: стаклени + јаглородни влакна и на крај композитните цевки врз основа на стаклени влакна.

- Во однос на цената на чинење највисока цена покажаа композитните цевки врз основа на јаглородни влакна, потоа пониска цена имаат композитните цевки врз основа на хибриден материјал, а цевките врз основа на стаклени влакна се со најниска цена на чинење.

- Во однос на масата на композитните цевки беше заклучено дека за иста отпорност на внатрешен притисок, најмала маса имаат композитните цевки врз основа на јаглородни влакна, потоа малку поголема маса имаат композитните цевки врз основа на хибриден материјал и најголема маса имаат тие врз основа на стаклени влакна.

- Беше направена споредба на композитните цевки со конвенционалните метални цевки од прохром при што беше заклучено дека композитните цевки се поотпорни на високи внатрешни притисоци, а притоа полесни и со многу пониска цена.

- Беше заклучено дека композитните цевки добиени со процес на намотување на влакна 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 на многу повисоки

притисоци. Композитните цевки кои се издржливи на висок внатрешен притисок, а се применуваат главно за транспорт на течности, имаат повеќе предности во споредба со металните и челичните цевки. Некои од основните предности се помалата тежина, отсуството на корозија, двојно подолг период на повторно тестирање, повисок степен на безбедност во присуство на оган и др. Сите овие предности го оправдуваат нивното производство.

- Најниска цена од сите типови композитни цевки имаат тие врз основа на стаклени влакна, но истите тие имаат и најголема маса.

- Примената на композитните цевки најчесто е за транспорт на флуиди, за резервоари и цистерни за хемикалии и гориво. Кој тип на композитни цевки ќе се применат зависи од тоа што се зема како услов. Доколку е потребно да се користат композитни цевки со мала маса и голема отпорност на внатрешен притисок тогаш потребно е да се применуваат тие врз основа на јаглеродни влакна или врз основа на хибридни материјали. Во случај кога масата не е критериум и не се бара многу голема отпорност на внатрешен притисок тогаш најсоодветно е да се применат композитни цевки врз основа на стаклени влакна.

9. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

1. P. Keller, Six Sigma – a self teaching guide, McGraw-Hill, New York, 2005.
2. G.Ruxton, N.Colegrave, Experimental Design for the Life Science, Oxford University Press, 2013.
3. J.Goupy, L.Creighton, Introduction to Design of Experiments, SAS Publishing, 2007.
4. A.Dean, D.Voss, Design and Analysis of Experiments, Springer-Verlag New York, Inc. 1999.
5. M. Soković, D. Pavletić, Quality improvement – PDCA-cycle vs. DMAIC and DFSS, Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering 53 (6): 369-378, 2007
6. Knowles, Greame, Profit from Six sigma: A Guide to Principles and practice for business benefit, 2012, ISBN 978-87-403-0057-4;
7. P. H. Osanna, M. N. Durakbasa, , A. Afjehi-Sadat,. Quality in Industry, Vienna University of Technology, TU AuM, Wien, 2004.
8. R. Basu, Implementing Quality – A Practical Guide to Tools and Techniques, Thomson Learning, UK, 2004.
9. D. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, 5th Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2001.
10. Н.Спирин, В.Лавров, Методи планированија и обработки резултатов инженерного експеримента, ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, Екатеринбург, 2004.
11. В.Риков, В. Иткин, Математическаја статистика и планирование експеримената, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, 2008.
12. И. Агајинц, А. Орлов, Планирование експеримента и анализ данних, МИТХТ, Ломоносов, Москва, 1998.
13. С.А. Семонов, Планирование експеримента в химии и хемическој технологији, Москва, 2005 (www.mitht.ru/e-library).
14. Ф. С. Новик and Я. Б. Арсов. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. Москва, Машиностроение, 1980.
15. Dean and D. Voss. Design and Analysis of Experiments. Springer-Verlag New York, 1999.
16. 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.

17. N. Akkus, G. Genc and C. Girgin. Control of the presentation in Filament winding process. *Acta mechanica et automatica*, vol.2 (3), 2008.
18. D. Cohen. Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength. Elsevier Science Limited, *Composites Part A 28A 1035-1037 G'*, 1997.
19. Stanley T. Peters, Yu. M. Tarnopol'skii, A. I. Beil, "Handbook of Composites" Chapter - Filament Winding, Pages 456-475 Springer US, 1998.
20. Sanjay K. Mazumdar, *Composites Manufacturing - Materials, Products and Process Engineering*.: CRC Press LLC, 2002.
21. Deborah D.L. Chung, *Composite Materials*. London: Springer-Verlag London Limited, 2010.
22. Various Authors, *ASM Handbook - Composites*.: ASM International, 2001 various Authors, *ASM Handbook - Composites*.: ASM International, 2001.
23. Daniel Gay, Suong V. Hoa, and Stephen W. Tsai, *Composite Materials - Design and Application*.: CRC Press, 2003.
24. Suong V. Hoa, *Principles of the Manufacturing of Composite Materials*, ASM International, Ed.: DEStech Publications Inc. , 2009.
25. S. Koussios, *Filament Winding: a Unified Approach*.: DUP Science, 2004.
26. 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.
27. www.huntsman.com.
28. Hoffman Engineering. [Online].
29. ISO - International Standards, ISO 11439:2000.: ISO, 2000.
30. European standard for Industrial piping -EN 13480-3
<http://smt.sandvik.com/en/materials-center/pressure-calculations/pressure-calculations/?step=4&standard=EN&grade=3R12&grade=3R60&dimension=108.4%20%C3%97%204&tolerance=10&pressure-unit=Bar>.
31. S. Michael, Hildebrand and Fire Marshals, *Composite Propane Cylinders An Overview of Fire Safety Risks for Emergency Responders*, SCP 1 Noll, Ed., 2007.
32. Mikrosam. www.mikrosam.com
34. Ralph Funck and Hans-Peter Fuchs, *Development of All-Composites Compressed Natural Gas (CNG) Pressure Vessels for Vehicle Use*.: ICCM-13, Beijing-China, 2001.
35. Federal Mogul - DEVA composites *Composites, Self Lubricating bearings for Marine and Offshore Applications*., 2010.

10. ПРИЛОЗИ

*Прилог 1. Критични вредности за горно 0.05 ниво на значајност или $P = 0,95$
Кохренов критериум*

N	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	17	37	145	∞
2	.9985	.9750	.9392	.9057	.8772	.8534	.8332	.8159	.8010	.7880	.7341	.6602	.5813	.5000
3	.9669	.8709	.7977	.7457	.7071	.6771	.6530	.6333	.6167	.6025	.5466	.4748	.4031	.3333
4	.9065	.7679	.6841	.6287	.5895	.5598	.5365	.5175	.5017	.4884	.4366	.3720	.3093	.2500
5	.8412	.6838	.5981	.5441	.5065	.4783	.4564	.4387	.4241	.4118	.3645	.3066	.2513	.2000
6	.7808	.6161	.5321	.4803	.4447	.4184	.3980	.3817	.3682	.3568	.3135	.2612	.2119	.1667
7	.7271	.5612	.4800	.4307	.3974	.3726	.3535	.3384	.3259	.3154	.2756	.2278	.1833	.1429
8	.6798	.5157	.4377	.3910	.3595	.3362	.3185	.3043	.2926	.2862	.2462	.2022	.1616	.1250
9	.6385	.4775	.4027	.3584	.3286	.3067	.2901	.2768	.2659	.2568	.2226	.1820	.1446	.1111
10	.6020	.4450	.3733	.3311	.3029	.2823	.2666	.2541	.2439	.2353	.2032	.1655	.1308	.1000
12	.5410	.3924	.3264	.2880	.2624	.2439	.2299	.2187	.2098	.2020	.1737	.1403	.1100	.0833
15	.4709	.3346	.2758	.2419	.2195	.2034	.1911	.1815	.1736	.1671	.1429	.1144	.0889	.0667
20	.3894	.2705	.2205	.1921	.1735	.1602	.1501	.1422	.1357	.1303	.1108	.0879	.0675	.0500
24	.3434	.2354	.1907	.1656	.1493	.1374	.1286	.1216	.1160	.1113	.0942	.0743	.0567	.0417
30	.2929	.1980	.1593	.1377	.1237	.1137	.1061	.1002	.0958	.0921	.0771	.0604	.0457	.0333
40	.2370	.1576	.1259	.1082	.0968	.0887	.0827	.0780	.0745	.0713	.0595	.0462	.0347	.0250
60	.1737	.1131	.0895	.0765	.0682	.0623	.0583	.0552	.0520	.0497	.0411	.0316	.0234	.0167
120	.0998	.0632	.0495	.0419	.0371	.0337	.0312	.0292	.0279	.0266	.0218	.0165	.0120	.0083
∞	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000

(Во редот кој е врамен со црвена рамка е вредноста на k , N е број на серии на паралелни опити)

Прилог 2. Фишеров критериум

Табела за F-статистика, P = 0,05

df2\df1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.73	8.71	8.70	8.69	8.68	8.67	8.67	8.66
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.89	5.87	5.86	5.84	5.83	5.82	5.81	5.80
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.66	4.64	4.62	4.60	4.59	4.58	4.57	4.56
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.98	3.96	3.94	3.92	3.91	3.90	3.88	3.87
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.55	3.53	3.51	3.49	3.48	3.47	3.46	3.44
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.26	3.24	3.22	3.20	3.19	3.17	3.16	3.15
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.05	3.03	3.01	2.99	2.97	2.96	2.95	2.94
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.89	2.86	2.85	2.83	2.81	2.80	2.79	2.77
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79	2.76	2.74	2.72	2.70	2.69	2.67	2.66	2.65
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69	2.66	2.64	2.62	2.60	2.58	2.57	2.56	2.54
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60	2.58	2.55	2.53	2.51	2.50	2.48	2.47	2.46
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53	2.51	2.48	2.46	2.44	2.43	2.41	2.40	2.39
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.45	2.42	2.40	2.38	2.37	2.35	2.34	2.33
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.46	2.42	2.40	2.37	2.35	2.33	2.32	2.30	2.29	2.28
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.41	2.38	2.35	2.33	2.31	2.29	2.27	2.26	2.24	2.23
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.37	2.34	2.31	2.29	2.27	2.25	2.23	2.22	2.20	2.19
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.34	2.31	2.28	2.26	2.23	2.21	2.20	2.18	2.17	2.16
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.31	2.28	2.25	2.23	2.20	2.18	2.17	2.15	2.14	2.12
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.26	2.23	2.20	2.17	2.15	2.13	2.11	2.10	2.08	2.07
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.22	2.18	2.15	2.13	2.11	2.09	2.07	2.05	2.04	2.03
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.18	2.15	2.12	2.09	2.07	2.05	2.03	2.02	2.00	1.99
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.15	2.12	2.09	2.06	2.04	2.02	2.00	1.99	1.97	1.96
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.13	2.09	2.06	2.04	2.01	1.99	1.98	1.96	1.95	1.93

Прилог 3. Студентов критериум

Студентов критериум	
P=0,95	
f	t
1	12,71
2	4,30
3	3,18
4	2,78
5	2,57
6	2,45
7	2,36
8	2,31
9	2,26
10	2,23
11	2,20
12	2,18
13	2,16
14	2,14
15	2,13
16	2,12
17	2,11
18	2,10
19	2,09
20	2,09