



УНИВЕРЗИТЕТ „ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ“ – ШТИП

ТЕХНОЛОШКО-ТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ИНДУСТРИСКИ ДИЗАЈН НА ТЕКСТИЛ

ШТИП

Иван Златков

**ПРИМЕНА НА ПЛАНИРАЊЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТИ ЗА ДОБИВАЊЕ НА
ТЕКСТИЛНИ КОМПОЗИТИ**

МАГИСТЕРСКИ ТРУД

Штип, 2019

Иван Златков

**Примена на планирање на експерименти за добивање на текстилни
композити**

Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип

Комисија за оценка и одбрана

Ментор: **д-р Винета Сребренкоска**

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

Член: **Д-р Димко Димески,**

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

Член: **Д-р Светлана Ристеска,**

Вонреден професор на Институтот за современи
композити и роботика во Прилеп

Научно поле: Текстилно инженерство (223)

Научна област: Текстилни и технички влакна (22300)

Хемија на текстилот (22302)

Датум на одбрана: _____

ПОСВЕТА И БЛАГОДАРНОСТ

Чест и задоволство ми е да изразам искрена и огромна благодарност на мојата менторка проф. д-р Винета Сребренкоска за неизмерната и безрезервна поддршка во текот на целокупното мое студирање, дипломирање и магистрирање, како и за поддршката и стручните совети во текот на изработката на магистерската работа за укажаната помош, стручните совети, изборот на методите и насоките како и конечното оформување на овој магистерски труд.

Благодарност до Институтот за современи композити и роботика во Прилеп за излегување во пресрет и поддршка во моето истражување.

На крај, сакам да изразам благодарност до моето семејство кое безрезервно ме поддржуваше и помагаше при изработката на магистерскиот труд.

Рецензирани и објавени трудови:

1. Zlatkov, Ivan; Zezova, Silvana; Risteski, Sanja; Srebrenkoska, Vineta and Risteska, Svetlana (2019), **EFFECT OF WEAVE OF FABRIC AND MOLDING PRESSURE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE LAMINATES**. In: Internacional conference, Contemporary trends and innovations in the textile industry 2019, 16-17 May 2019, Belgrade, Serbia.

ПРИМЕНА НА ПЛАНИРАЊЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТИ ЗА ДОБИВАЊЕ НА ТЕКСТИЛНИ КОМПОЗИТИ

Краток извадок

Во овој магистерски труд направено е истражување за производство на композитни плочи. Беше направено истражување за примена на технички влакна во форма на панама и кепер преплет за добивање на композитни плочи со користење на технологијата компресионо пресување. Беа користени стаклени ткаенини како зајакнувачки материјал и епоксиден смолен систем за добивањето на полупроизвод – препрег со рачно импрегнирање. Потоа, беа произведени композитни плочи со различен дизајн, т.е. зајакнати со ткаенина со различен тип на преплет, пресувани на различен притисок и беше направена карактеризација на механичките карактеристики на добиените композитни плочи.

Беше направен дизајн и анализа на процесот со помош на полн двофакторен експеримент со земање на два фактори кои најмногу влијаат на процесот и со нивно менување на две нивоа: минимална и максимална вредност. Земени беа следните фактори, односно параметри на процесот: тип на преплет и притисок на пресување. Врз основа на план матрицата направени се 4 експерименти со менување на двата фактори на две нивоа (2^2). Добиени се 4 различни примероци – композитни плочи и за сите беше определена јачината на свиткување. Врз основа на добиените резултати, добиена е адекватна регресиона равенка која најдобро го опишува влијанието на избраните фактори врз јачината на свиткување, односно врз отпорноста на композитот сè до негова целосна деструкција. Од добините резултати и регресионата равенка добиен е заклучокот дека влијанието на типот на преплет кај зајакнувачката компонента е поизразено, додека влијанието на притисокот на пресување е помало.

Од добиените резултати беше заклучено дека примената на подобар тип на зајакнувачка ткаенина (во случајов кепер) и поголем притисок на пресување ќе резултира со најголема јачини на свиткување кај композитните плочи, односно ќе се добијат композити кои ќе поседуваат најдобри механички карактеристики.

Клучни зборови: Композитни плочи, дизајн на експерименти, стаклени ткаенини, тип на преплет, притисок.

APPLICATION OF PLANNING OF THE EXPERIMENTS FOR OBTAINING TEXTILE COMPOSITES

Abstract

Within the frames of this study, the research for the application of technical fibers in the form of twill and basket weave in obtaining composite plates using the technology of compression molding was performed. Glass fabric, as a reinforcing material and epoxy resin system were applied for obtaining of the prepreg material. Then, composite plates with different design were produced, i.e., reinforced with different type of weave, and different pressure were produced and the mechanical characterization of the obtained composite structures was made.

Design of the process through the application of two-factorial method for experimental planning with two levels of variation (2^2) was made. Two major factors have been taken into consideration when designing the composites: the type of weave and moulding pressure. A designing was made for improving of the industrial process, i.e. planning of the experiments and on the basis of the plan matrix, 4 models of composite plates were manufactured. For all manufactured composite plates the flexural strength was tested in a lab. The ultimate goal is to establish which factor has bigger influence on the mechanical properties of the composite. 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 type of weave, as a process parameter, has the greatest influence on the flexural strength of the composite plates. Also, it can be noted that the pressing pressure as a process parameter X_2 influences the flexural strength of the of the composite plates, but with a lower intensity.

Namely, the application of better type of reinforcing fiber (twill, in this case), and higher moulding pressure will result in highest flexural strength of the composite plates, i.e. composites will have the best mechanical properties.

Key words: Composite plates, design of experiments, glass fabrics,type of weave, pressure.

СОДРЖИНА

	Стр.
1. ВОВЕД	11
2. ТЕОРЕТСКИ ДЕЛ	18
2.1. Композитни материјали – дефиниции, својства и примена	18
2.2. Структурни елементи на композитните материјали	21
2.2.1. Зајакнувачки материјал	21
2.2.1.1. Стаклени влакна	27
2.2.2. Полимерна матрица за композити	33
2.2.2.1. Епоксидни смоли	36
2.3. Споредба на композитите со конвенционалните материјали	41
2.4. Технологија на рачно импрегнирање	43
2.5. Технологија на компресионо пресување	46
2.6. Дизајн на експерименти – краток историјат на експериментирањето	52
2.6.1. Постапка за дизајнирање на експерименти	54
2.6.2. Факторен дизајн	55
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН ДЕЛ	58
3.1. Материјали користени за експериментите	59
3.2. Добивање на препрег со рачна импрегнација	60
3.3. Производство на композитни плочи	62
3.4. Планирање и дизајн на експеримент	63
3.5. Определување на јачина и модул на еластичност при свиткување	66
4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА	70
4.1. Определување на регресиона равенка, односно равенка	70

за модел од прв ред со два фактори

5. ЗАКЛУЧОК 80

6. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА 82

Листа на табели 85

Листа на слики 86

1. ВОВЕД (INTRODUCTION)

Материјалите се среќаваат во различни сегменти од нашето живеење, поради што со право може да се рече дека нашето секојдневие е под влијание на материјалите. Практично во секој сегмент од нашиот живот доаѓаме во контакт со различни видови материјали (во градежништвото, во транспортот, домаќинството...). Материјалите треба да исполнат одредени барања за да се дефинира нивната примена. Така, на пример, за одредена намена, материјалите треба да издржат одредено оптоварување, да изолираат или да спроведуваат топлина / електрична енергија, да прифатат или да одбијат магнетен флуks, да пренесат или да одбијат светлина, а притоа да не ја оштетат животната средина и да се евтини.

Историски гледано, развојот на општеството е тесно поврзан со развојот на материјалите и нивната употреба. Материјалите коишто се користеле на самиот почеток на постоењето на човекот се: каменот, дрвото, глината и др., но со текот на времето, со помош на нови техники, се развивале нови материјали коишто имале подобри својства (грнчарија, метали...). 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. Развојот на многу технологии, кои го овозможуваат нашиот современ начин на живеење, е тесно поврзан со развојот и достапноста на одредени материјали. 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 според кои ќе се изврши крајниот избор. Прво, потребно е да се дефинираат условите при кои ќе биде применет 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. Последен, но не помалку важен критериум е цената на чинење на материјалот. Така, може да се најде материјал кој ќе има одлични својства и кој нема да биде премногу скап. Во секој случај, потребно е да се направи компромис со цел да се пронајде оптимално решение за дадени потреби.

Со познавањето на различните карактеристики на материјалите, релацијата структура – својства, како и постапките за процесирање на материјалите, може да се направи правилен и сигурен избор на материјали, во согласност со зададените барања [1, 2.22].

Вообичаено е да се поделат сите инженерски материјали на метали, полимери, керамика и композити. Современите технолошки достигнувања имаат потреба од материјали со такви својства какви што немаат ниту легурите, ниту керамичките материјали, ниту пак полимерите. Како пример може да се посочи потребата за одредени деловите од авионската индустрија каде што од материјалот се бара мала густина, голема цврстина, голема крутост и сл. Такви својства можат да се добијат со примена на композитните материјали. Својствата на композитот се многу подобри од својствата на одделните компоненти. Треба да се истакне дека, во поново време, кога се зборува за композит, се подразбира систем кој исклучиво е направен од неметални материјали кои се состојат од влакнести зајакнувачи како, на пр., стакло, јаглород и сл., вметнати во некој полимерен систем.

Од историска перспектива, треба да се каже дека појавата на композитите датира многу одамна. Првиот композитен материјал познат во историјата била глина зајакната со слама за градење на ѕидовите на стариот Египет пред околу 3.000 години. Исто така, пред стотина години, откриено е дека јачината на дрвените структури може да биде многу подобрена со лепење (или ламинирање) на тенки парчиња од дрво заедно, при што слоевите можат да бидат ориентирани во различни насоки. Така е родена структурата наречена ламиниран (слоест) композитен материјал (laminated composite material).

Во последната деценија, развојот на нови полимерни композитни материјали се раководи од критериумите на индустријата, техничко-економските и еколошките критериуми и сè повеќе е насочен кон добивање материјали со добри механички својства, а со што помали трошоци на производство. Полимерните композити припаѓаат на релативно нова група индустриски композити кои се во употреба повеќе од половина век. Со комбинирање на два материјали, влакна и

матрица, се добиваат специфични производи со уникатни својства. Јакоста и цврстината се добиваат од зајакнувачот, односно од влакната кои можат да бидат поставени случајно или ориентирани во континуирани и дисконтинуирани форми. Постојат многу материјали кои можат да се користат како зајакнувачи. Во технологиите на современите композити доминираат: стаклените, јаглородните и араидните влакна. Полимерните композитни материјали зајакнати со влакна претставуваат големо семејство на материјали кои се користат како одговорни структури во голем број индустриски сектори, кои можат да бидат изложени на оптоварување. Терминот текстил се користи за опишување на текстилните материјали и производи кои се добиваат од влакна и нитки со различни техники за нивна преработка. Текстилните материјали по својата хемиска структура припаѓаат во најсложени, а по својствата во најразновидни материјали, така на пример, според финоста припаѓаат во најфини и најмеки материјали, а по специфичната јачина во најјаки. Сите влакна се изградени од високомолекуларни соединенија наречени полимери, а името го добиле по големината на молекулската маса која се движи од 10.000 до неколку милиони. Молекулите на овие соединенија се викаат макромолекули и се изградени од основни структурни единици кои се повторуваат, поврзани меѓусебно со ковалентни врски. Значи, таквите текстилни материјали можат да обезбедат многу добар зајакнувачки медиум за полимерните композити. Полимерните композитни материјали зајакнати со влакна привлекуваат голем интерес и од академската заедница и од индустријата. Ова семејство на материјали, врз основа на цената и нивните перформанси, дава големи можности за нивна примена во различни индустрии. Причините за применување на полимерните композитни материјали зајакнати со влакна можат да бидат различни и комплексни, но сепак, примарната компонента за употребата на текстилните зајакнувачи е несомнено цената. Текстилот, односно влакната можат да се произведуваат во големи количини со разумни трошоци и тоа со користење на современи, автоматизирани производствени техники. Директното користење на влакната или предивото може да биде поевтино во однос на материјалните трошоци, но овие материјали се тешки за ракување и за процесирање до формирање на сложени структурни форми.

Композитните материјали зајакнати со влакна се применуваат во многу индустрии како што се: авиоиндустријата, поморската индустрија, наменската индустрија, транспортната, градежништвото, електроиндустријата, и други.

Како пример, во медицината имаат широка примена кај: протези, забна протетика, инвалидски колички и помагала, различни болнички апарати и опрема, други средства во медицината, разновидни алати од типот на скалпели, специјални ножички и друго. Други области на примена вклучуваат структури за градежништво, на пример, во мостови кои нудат значителни заштеди на трошоците за инсталација поради нивната мала тежина, заштитни кациги за градежните работници, изработка на цевки, изработка на алати за потребите на градежништвото и сл. Постојат бројни примени на овие композити и во автомобилската индустрија како, на пример, за ентериери во возилата, за каросериска изведба на автомобилите, за изработка на резервоари за бензин и резервоари за вода итн. [3].

Во зависност од типот, намената и својствата кои треба да ги поседува композитниот материјал, постојат повеќе методи и процеси за производство. Изборот зависи од видот на материјалот (терморективен или термопластичен), обликот, перформансите и бројот на производни единици. За производство на големи количества производи, задолжителни се автоматизирани процеси со висока продуктивност. Производни техники кои се применуваат, често се и рачно импрегнирање и компресионо пресување. Предмет на истражување на овој труд се токму овие две техники на производство на композитни материјали [4].

Рачното импрегнирање е најчестиот и најевтиниот начин на отворен капап, бидејќи бара најмалку количество опрема. Зајакнувачките влакна се поставуваат рачно, а смолата се нанесува со четка или валјак (ролери). Овој процес се користи за производство на големи и мали предмети, вклучувајќи чамци, резервоари за складирање, кади и тушеви. Рачното импрегнирање е наједноставниот метод за леене на композити, нудејќи ниски трошоци за обработка, при што едноставната обработка нуди широк спектар на големини на деловите. Минималната

инвестиција во опремата, во комбинација со квалификувани оператори, овозможува добра стапка на производство и конзистентен квалитет.

Компресионо пресување претставува една од поважните технологии за добивање полимерни композитни материјали. Кога како зајакнувачи се користат природни влакна, постојат неколку различни начини на пресување во калап. Генерално, разликите се во начинот на комбинирање на влакната и полимерната матрица и нивното внесување во калапот. Во некои процеси се применува мат од природни влакна и термопластична матрица кои во калапот се внесуваат преку екструдер во облик на растоп (на пример, EXPRESS процесот), во други пак, во калапот се внесува мат од термопластична матрица зајакната со природни влакна, мат од терморективна матрица зајакната со природни влакна или хибриден мат од влакна на полимерот и природни влакна, а понекогаш се користи и прашкаст полимер кој се додава во влакнестиот мат пред пресување во калапот. Бидејќи, најчесто во сите опции влакната се применуваат во облик на мат, сечкањето на влакната и процесирањето на матовите е основно барање при постапката на пресување во калапи. Со својот краток циклус и висока стапка на производство, многу организации во автомобилската индустри ја избираат оваа технологија (компресионо пресување) за производство на деловите [4, 5].

ЦЕЛ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО

Врз основа на теоретски сознанија за примена на планирање на експерименти за добивање текстилни композити со помош на технологиите рачно импрегнирање и компресионо пресување, како и барањата за развој и примена на такви композитни материјали во различни индустрии, произлезе мотивот и определбата за темата на оваа магистерска работа.

Во рамките на оваа магистерска работа, главна цел беше да се направи истражување за примена на планирање на експерименти за добивање текстилни композити со користење на технологиите рачно импрегнирање и компресионо пресување, Поточно, цел на истражувањата во рамките на оваа магистерска работа беше да се покаже примената на стаклените влакна како зајакнувачки

материјал во добивањето на полимерните композитни плочи. За реализација на поставената цел беа произведени композитни структури со примена на технологиите рачно импрегнирање и компресионо пресување.

Инженерските истражувања се спроведуваат во сферата на инженерската пракса и се насочени кон конкретизирање на познати научни знаења, кои се применуваат за решавање на одредена инженерска задача. Цел на инженерските студии е добивање на веродостојни информации за откривање на закономерностите, појавите и процесите кои се случуваат во истражувањето на дадениот експеримент. Нејасно поставената цел на истражувањето може да доведе до собирање непотребни податоци, во процесот на мониторинг, или да не бидат добиени потребните податоци за подоцнежна анализа на информациите.

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.

Методите на експерименталниот дизајн наоѓаат широка примена во многу гранки од науката и техниката. Како што веќе претходно спомнавме, експериментирањето можеме да го гледаме како дел од научниот процес и како еден од начините со кои учиме како системот или процесот функционира. Генерално, учиме низ серија од активности во кои правиме претпоставки за процесот, изведуваме експерименти за да добиеме податоци од процесот, и потоа ги користиме информациите од експериментот за да воспоставиме нови претпоставки, кои водат до нови експерименти, итн.

Решавањето на мноштво проблеми во хемијата и хемиската технологија, како и во останатите гранки од инженерството, често е поврзано со изведување на сложени и скапоцени експерименти. Оттука е разбирливо значењето од постоењето на начини и методи за оптимално планирање на експериментите, кои во низа случаи овозможуваат суштествено да се скратат времето и материјалните трошоците при извршување на истражувањето. Поради овие причини, целта на магистерската работа е оптимизација на процесите рачно импрегнирање и

компресионо пресување со помош на примена на планирање на експерименти преку полн двофакторен експериментален дизајн.

Целата магистерска работа е поделена на неколку делови, односно содржи Теоретски дел, Експериментален дел, Резултати и дискусија, и Заклучок. На почетокот, т.е. во Теоретскиот (првиот) дел, даден е литературен преглед на примената на стаклените влакна за добивање на композитни структури, објаснети се технологиите рачно импрегнирање и компресионо пресување, машините, уредите и деловите кои се користат во нив, како и примената ка композитните структури добиени со овие техники. Во Експерименталниот (вториот) дел се дадени карактеристиките на одделните конституенти (материјали) кои се користени за добивање на композитните структури, определени се највлијателните два параметри и притоа се користи двофакторен метод за планирање на експерименти со две нивоа на варијација 2^2 . Врз основа на тоа, направени се експерименти, односно произведени се четири типови на композитни плочи кои потоа механички се тестирани. Во третиот дел се претставени добиените резултати и нивна дискусија. На крај, сумирани се значајните заклучоци за примената на стаклените влакна во добивање на композитните плочи и за карактеристиките на истите.

Магистерската работа, покрај тоа што има научен придонес во истражувањата поврзани со примена на планирање на експерименти за добивање на текстилни композити со помош на технологиите рачно импрегнирање и компресионо пресување, исто така има и практичен придонес. Имено, сознанијата добиени од истражувањата можат да послужат во сите индустриски капацитети поврзани со добивање и примена на композитни материјали.

2. ТЕОРЕТСКИ ДЕЛ (THEORETICAL PART)

2.1. Композитни материјали – дефиниции, својства и примена (Composite materials – definitions, properties and application)

Композитите се едни од најдобрите материјали на XX век. Зборот композит (Composite) дословно значи „направен од неколку делови“. 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.

Попрецизираната популарна дефиниција за композити подразбира само неметални материјали кои се состојат од влакнести зајакнувачи како што се стакло, јаглород или кевлар, инкапсулирани во стврдната матрица на еден од неколкуте стотици полимерни системи. Овие композитни материјали се карактеризираат со нивните релативно високи односи јачина / тежина во споредба со традиционалните метални компоненти.

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

Композитите ги сочинуваат два основни елементи: зајакнувач и матрица или полимерен систем за композити со органска матрица. Важно е да се разбере дека за најголем дел композитни делови, јачината е одредена од зајакнувачот, не од матрицата, иако таа е неопходна во поврзувањето на зајакнувачите - влакната и го пренесува оптоварувањето меѓу влакната во сите насоки и меѓуслоеве [6].

Постојат многу материјали кои можат да се користат како зајакнувачи. Во технологиите на современите композити доминираат: стаклените, јаглородните и араמידните влакна. Матрицата која се наоѓа меѓу влакната е неопходна за

нивното поврзување и го пренесува оптоварувањето меѓу влакната во сите насоки и меѓуслоеве. Исто така, матрицата ги заштитува влакната, кои се обично лесно кршливи, од абразија и корозија под дејство на надворешни влијанија. Во зависност од применетиот материјал за матрица, полимерните композити се поделени во две групи: термопластични (thermoplastics) и термореактивни (thermosetting).

Термопластичните полимерни матрици при загревање омекнуваат или се топат, а при ладње повторно се втврдуваат. Овој процес може да биде често повторуван, при што во полимерот не се случуваат никакви хемиски промени. Типични термопластици се *полиамидите*, *полипропиленот* и *АБС*. Тие се зајакнувани најчесто со кратки, сецкани влакна [5, 6].

Термореактивните полимери содржат молекули кои се вмрежени и при загревање не омекнуваат. Термореактивните полимерни матрици се формираат при реакција, во која смолата и вцврснувачот или смолата и катализаторот се мешаат и потоа трпат иреверзибилна хемиска реакција. По вмрежувањето, кое најчесто се изведува на повишени 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 полиестите и епоксидите) се вмрежуваат без издвојување испарливи супстанции како нус продукт и тие се многу полесни за процесирање (адисии реакции).

Пред употребата на влакната зајакнувачи се врши површинска обработка (size) за да се обезбеди компатибилност со полимерот, односно добра адхезивност влакно / матрица. За да се добијат посакуваните карактеристики кај композитниот материјал, потребно е влакната да не содржат дефекти (површински или внатрешни) и оптоварувањето ефикасно да се пренесува од матрицата врз влакната преку интерфејсот.

Некои општи предности на композитните материјали во споредба со конвекционалните се:

- Способност да се создадат комплексни форми;

- Намалување на трошоците за дополнителна обработка на деловите;
- Постои можноста за поврзување (спојување) на деловите во текот на процесот на производство;
- Димензиона стабилност при екстремни работни услови;
- Отпорност на корозија;
- Дизајнирање на својства;
- Мала тежина;
- Електрична изолација, звучна и топлинска изолација;
- Висока специфична јачина и цврстина;
- Добри својства на замор;
- Лесно одржување.

Од друга страна, пак, композитните материјали имаат и некои свои недостатоци во споредба со металите. Механичките карактеристики на композитните материјали врз основа на полимерна матрица опаѓаат драстично на високи температури, или во случаи на долготрајна изложеност на влага, масла, горива или други јаглени хидрати.

Процеси за композитните материјали не се толку добро развиени како што се оние за металите и нивните легури. Во одредени случаи многу поскапо е да се произведе структура од композит, отколку еквивалентна метална структура. Меѓутоа, и покрај тоа што се смета дека високата цена на чинење за добивање одредени видови композити ќе го намали нивното присуство во одредени структури, сепак, нивното учество во секојдневните градби и истражувања е сè поприсутно.

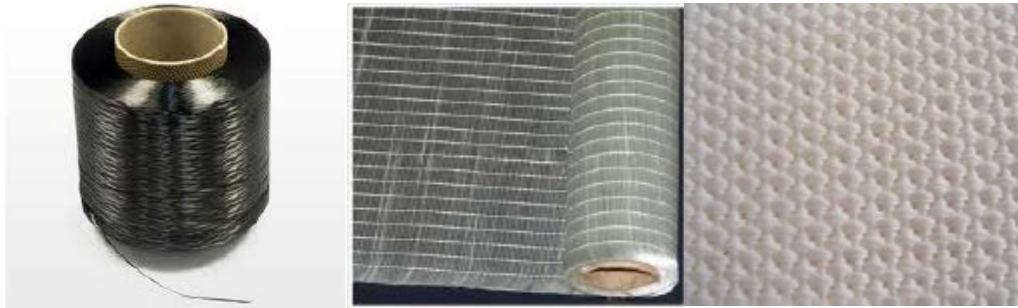
Полимерните композитни материјали се материјали на иднината. Тие широко се користат во специјални области на современата техника. Зајакната пластика на основа на стаклени, полимерни, јаглородни и керамички влакна наоѓа сè поширока примена во авиоиндустријата, автомобилската индустрија, машинството, градежната индустрија итн. Зајакнатата пластика поседува висока јачина и тврдина, ниска густина, отпорност на влага и хемикалии, корозивна стабилност [6, 7].

2.2. Структурни елементи на композитните материјали (Structural elements of composite materials)

2.2.1. Зајакнувачки материјал (Reinforcing material)

Механичките својства на композитите, како што се јачина и цврстина, зависат од зајакнувачкиот материјал. Примарната задача на влакната е да го прифатат оптоварувањето, тоа особено е важно за структурните композити каде што влакнаа носат 70 - 90 % од оптоварувањето.

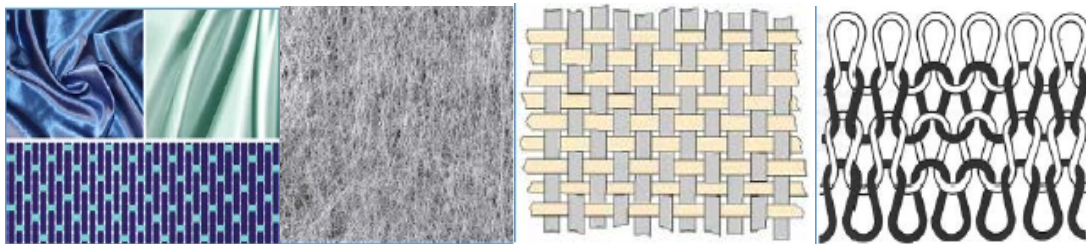
Постојат многу материјали кои можат да се користат како зајакнувачи. Во технологиите на современите композити доминираат: стаклените, јаглородните и арамидните влакна. Доколку е потребно, за одредена апликација како компонента може да се користи и хибрид на два или повеќе зајакнувачи. Зајакнувачите можат да бидат достапни во различни форми: како континуиран ровинг (tow, roving), еднонасочна лента на паралелни, континуирани влакна (unidirectional), ткаен материал (woven) во различни геометрии, како сатен (satin) и обично ткаење (plain), плетенина (unwoven), филц или мат (nonwoven) - со случајно ориентирани влакна [6]. Сите овие форми обезбедуваат извесна предност, но и ограничување на композитната структура во однос на процесот на обликување, економичноста и естетиката [8].



*Континуиран ровинг
Roving*

*Еднонасочна лента
Unidirectional*

*Ткаен материјал
Woven*



*Сатен
Sateen*

*Филц или мат
Non woven*

*Обично ткаење
Plain*

*Плетенина
Unwoven*

Слика 2.1.: Различни форми на зајакнувачки текстилен материјал

Figure 2.1.: Various forms of reinforcement textile material

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

1. Glass - Стаклени влакна = Економичност;
2. Carbon - Јаглеродни влакна = Крутост;
3. Aramid - Арамидни влакна = Отпорност на удар;
4. Boron = Висок модул на еластичност;
5. 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. Јаглеродните влакна имаат повисоки модули и јачини. Нивните специфични модули се повисоки од челикот, но се

поскапи зајкнувачи. Кевларот, како органско арамидно влакно, обезбедува добри својства на истегнување и одлична отпорност на удар [6].

Споредбата на механичките својства на најчесто користените типови на зајкнувачи е дадена во Табела 2.1.

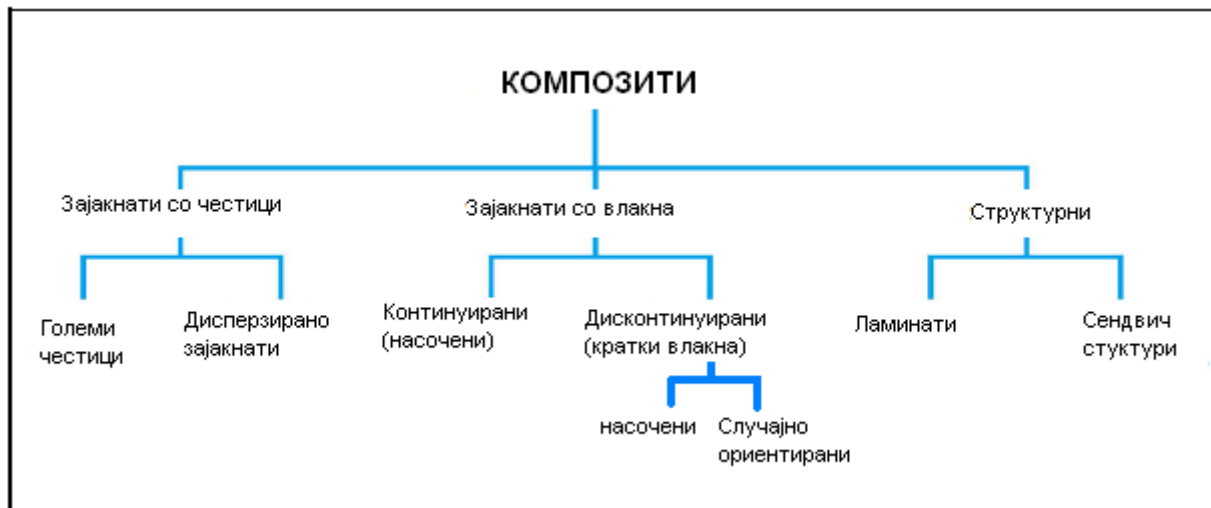
Табела 2.1.: Споредба на механичките својства на комерцијално достапни зајкнувачи влакна

Table 2.1.: A comparison of mechanical properties of commercially available reinforcements

Вид на влакно	Густина / Density, kg/m ³	Модул на еластичност / Modulus, GPa	Сила на затегање / Tightening GPa	Специфичен модул / Specific module	Спицифич на јачина /Spicy strength
Полиестер	1,38	11	1	8	0,72
Стаклени - E влакна	2,54	72	3,4	2,8	1,34
Стаклени - S влакна	2,49	86	4	34	1,57
Кевлар 49	1,45	130	3,6	90	2,48
Кевлар 29	1,44	69	2,9	49	2,02
Јаглородни влакна со висока јачина (HS)	1,74	277	3,1	30	1,77
Јаглородни влакна со висок модул (HM)	1,81	390	2,1	215	1,16

Својствата на композитниот материјал зависат од својствата на конститутивните фази, нивните удели, геометријата на зајакнувачот и атхезијата помеѓу зајакнувачот и матрицата. Геометријата подразбира форма, големина, распределба и ориентација на зајакнувачот во матрицата. Кај сите видови композитни материјали механизмот на зајакнување зависи од геометријата на зајакнувачот. Затоа, покрај другите начини на класификација на композитните материјали, се применува и класификацијата според зајакнувачот [6, 7, 8]. Според обликот на зајакнувачот, композитите можат да бидат:

- * Зајакнати со честички,
- * Зајакнати со влакна,
- * Структурни.



Слика 2.2.: Класификација на композитните материјали

Figure 2.2.: Classification of composite materials

Композитите зајакнати со континуирани влакна имаат најдобри механички особини. Тие не можат лесно да се прилагодат за масовно производство и се ограничени за производи каде предностите во својствата ги оправдуваат трошоците: на пример, како примарни структурни елементи во авионската

индустрија. Незајакнатите полимери можат да бидат обликувани во комплексни форми и главно се користат за неструктурни апликации.

Композитите зајакнати со кратки влакна ги вклучуваат предностите на претходно споменатите два типа. Композитите зајакнати со кратки влакна можат да бидат обликувани и процесирани на сличен начин како незајакнатите полимери. Доколку влакната имаат доволна должина, може да се постигне крутост блиска до композитите со континуирани влакна. Добрите особини кај композитите зајакнати со континуирани влакна се должат на континуираната структура на зајакнувачот и високата ориентацијата на влакната. Кај композитите зајакнати со кратки влакна, ориентацијата на влакната е хаотична. Како резултат на тоа, степенот на анизотропија е помал од оној кај композитите со континуирани влакна. Композитите со кратки влакна наоѓаат широка примена, затоа што можат да имаат уникатна комбинација на особини и се поконкурентни од другите материјали.

Во зависност од намената, влакната се сецкаат на одредена должина. Тие можат да бидат диспергирани во полимерната матрица во форма на густа маса - тесто за пресување - dough moulding compound (DMC) (прашкasti прес маси) или гранули. DMC содржи невмрежена смола и полнител, има многу добри својства на течење и може да биде процесирана со Методот на инјекционо пресување (injection moulding). Исто така, друга форма на почетен материјал се т.н. ленти за пресување - sheet moulding compound (SMC), каде кратките влакна се формирани во мат. Крајната технолошка етапа е обликување на листовите во топла преса, како резултат на вмрежување на смолата. Bulk moulding compound (BMC) - прес маса - претставува вискозна маса врз основа на термореактивна матрица зајакната со сецкани влакна, полнители и други адитиви за компресионо или инјекционо пресување [12].



а)

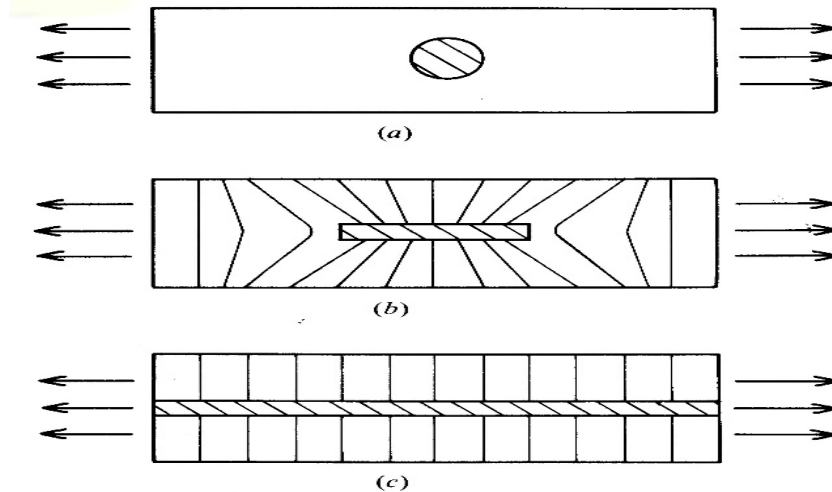
в)

Слика 2.3.: а) Термореактивна матрица зајакната со сецкани влакна,
в) Невмрежена смола и полнител

Figure 2.3.: a) Bulk moulding compound (BMC), в) Dough moulding compound (DMC)

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

Кај бесконечните влакна, ако се занемари ефектот на нивните краеве, може да се претпостави дека и влакната и матрицата се деформираат исто, а приложеното напрегање се дели меѓу двете фази пропорционално на нивните релативни површини на попречен пресек и модулите на еластичност. Во тој случај, внесувањето голем волуменски удел на јаки високомодулни влакна во нејака пластична матрица ќе овозможи во принцип целосна реализација на својствата на влакната [6-8].



Слика 2.4.: Влијание на карактеристичниот однос l/d на честичките на полнилото врз распределбата на напрегањата во матрицата: a- $l/d=1$, сферна честичка; b - кратко крто влакно, $l/d=10-1000$; c - бесконечно крто влакно, $l/d=\infty$

Figure 2.4.: Influence of the characteristic relation l/d of the particles on the distribution of stresses in the matrix: a) $l/d = 1$ spherical particle; b) short fiber, $l/d = 10-1000$; c) infinitely fiber, $l/d = \infty$

2.2.1.1. Стаклени влакна (Glass fibers)

Стаклото претставува неоргански, компактен и физички хомоген материјал. Тој е аморфен материјал кој се добива со топење на различни оксиди или соединенија и ладење на растопената маса, така што нејзиниот вискозитет се зголемува до потполно зацврстување, но притоа не кристализира. По дефиниција, стаклото претставува изладена стопена маса со многу голем вискозитет, без остро одредена точка на топење. Стаклата се дефинираат на овој начин бидејќи тие поседуваат некои од особините на течностите, како што се хомогеност, просирност и аморфност. Стаклото исто така може да биде безбојно или обоено, и бистро или матно.

Стаклените влакна се најмногу користените зајакнувачки влакна во индустријата на композитните материјали. Речиси со 90 % учествуваат како зајакнувачи на терморективните смоли. Се применуваат во вид на ровинг (континуирани струкови), сечкани струкови, ткаенини, мат (врз база на континуирани и сечкани влакна) и во мелена форма. Подолгите влакна покажуваат поголема јакост, додека најјаките се континуираните влакна. Претежно

се произведуваат како E (electrical grade) тип на влакна, додека појакиот, C тип на влакна (за една третина се појаки од E типот), заради високата цена на чинење се произведува во значително помало количество и тоа само за специјална намена. Други типови на стаклени влакна кои имаат ограничена примена се: D (dielectric), C (chemical), A (alkaline) и др. [4,9,10].

Табела 2.2.: Типови на стаклени влакна

Table 2.2.: Types of glass fibers

Ознака / Letter	Значење / Meaning	Својства / Properties
A (alkali)	алкално	Алкално/ Alkali
D (dielectric)	диелектрично	Ниска диелектрична константа / Low dielectric constant
C (chemical)	хемиско	Хемиски отпорно / Chemical resistant
M (modulus)	модул	Круто / Rigid
E (electrical)	електрично	Електро-изолационо / Electrical insulation
S (strength)	јачина	Голема јачина / Great strength

На пазарот постојат два типа на E-стаклени влакна. Обичното E-стаклено влакно содржи 4-6 % бор оксид. Строгите закони за заштита на околината бараат елиминација на борот од гасните продукти кои се емитуваат од растопите што содржат бор. За таа цел, потребно е вградување на скап систем кој ќе ја спречи емисијата на бор. Во последно време E-стаклените влакна без бор или флуор сè повеќе се применуваат во индустријата на стаклени влакна заради пониската цена и заради тоа што нема издвојување на штетни пареи при топењето на материјалот. Овие (безборни) стакла имаат дури и поголема хемиска постојаност кон кисели раствори отколку стаклото што содржи бор, но исто така имаат и повисока температура на топење. Заради одличната хемиска отпорност, посебно во кисела средина, формираат посебна подкласа од E-стаклото наречена ECR (chemically resistant). Без разлика на која варијанта му припаѓаат сите E-стаклени влакна се за општа намена бидејќи нудат добра јачина при ниска цена. Стаклените влакна на пазарот се среќаваат како: ровинг, ткаенина, ткаен ровинг, мат, предиво, конец, стаклена волна, сечкани влакна и сл.

Хемиски својства

Најважна хемиска особина на стаклото е отпорноста на дејство на сите други киселини освен на флуороводородната киселина, како и отпорноста на дејство на алкалии, што овозможува примена на стаклото како материјал за амбалажа. Посебно се испитува постојаноста на стаклото во вода, т.н. хидролитичка отпорност на стаклото, која се изразува преку количеството мигрирана алкалија од структурата на стаклото, под дејство на вода. Хидролитичката отпорност е особено важна при примена на стаклото како конструкционен материјал, за изработка на реактори во електрохемиски процеси, бидејќи мигрираните алкалии можат да влијаат на промената на рН вредноста на растворот.

Имајќи предвид дека секој оксид кој влегува во состав на стаклото има свој придонес кон одредена карактеристика на стаклото, врз база на хемискиот состав на стаклото, може да се процени придонесот на дадениот оксид врз севкупните карактеристики на стакленото влакно. Во Табела 3 е даден составот на некои типови влакна.

Табела 2.3.: Состав на некои типови стаклени влакна (% теж.)

Table 2.3.: Composition of some types of glass fiber (% mas)

Влакно/ Fiber	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	F ₂
<u>E</u>	52-56	4-6	12-15	21-23	0.4-4	0,2-0,5	0-1	0,2-0,4	0,2-0,7
<u>E- Без бор</u>	59	-	12.1	21,6	3,4	1,5	0,9	0,2	-
<u>D</u>	74,5	22.0	0.3	0,5	-	-	<1,3	-	-
<u>S</u>	60-65	-	23-25	0-9	6-11	-	0-0,1	0-0,1	-

Така, на пример, SiO_2 се одликува со многу мала термичка експанзија, додека Na_2O , K_2O – со висока експанзија и со слаба отпорност на дејството на водата, CaO , MgO – со подобра постојаност на дејството на вода, киселини и бази. Хемиското, С – стакло, т.е. натриум-калциум бор, силикатното стакло се одликува со извонредна хемиска постојаност спрема дејството на киселините и базите.

Физички и механички својства

Основни физички особини на стаклото се: просирност, мала топлотна спроводливост (која овозможува примена на стаклото како изолационен материјал), мала електрична спроводливост (која овозможува примена на стаклото како диелектричен материјал), густина – која се движи од 2,7-6,3 cm^3 ; цврстина на притисок (од 590 – 1080 N/mm^2); цврстина на кинење (од 40 – 80 N/mm^2); цврстина на свиткување (од 80 – 160 N/mm^2), еластичност (49000 – 78500 N/mm^2) и тврдина од 5-7 според Мосовата скала.

Високиот однос на јачина спрема тежина ги прави стаклените влакна супериорни материјали за апликации каде се бараат високи јакостни карактеристики, а притоа мала тежина. Сите типови на стаклени влакна се одликуваат со висок коефициент јачина на истегнување / маса, иако стаклените припаѓаат во синтетички неоргански влакна со највисока густина. Модулот и јачината на истегнување на стаклените влакна зависи од хемиската композиција на влакната. Внесувањето на модификатори во мрежата, како што се алкални елементи или нивни оксиди, резултира со намалување на модулот и јачината на истегнување. Модулот на типичните стаклени влакна е од редот 70-80 GPa. За типично Е-влакно јачината на истегнување е околу 3,5 GPa. Чисто силициумови филаменти покажуваат максимална јачина од 7 GPa. Борните, фосфатните и оловните силикатни стакла типично имаат јачина од приближно 1-2 GPa. S-стаклото има значително поголема содржина на силициум, алуминиум и магнезиум оксид од Е-стаклата и е за 40-70 % појако од нив. Стаклени влакна со голема јачина имаат голема содржина на SiO_2 во споредба со другите типови

стаклени влакна. Заради тоа, овие стаклени влакна имаат значително повисока температура на топење од конвенционалните Е-стаклените влакна. Стаклените влакна со најголема јачина на истегнување се познати како S-2 стаклени влакна и имаат за околу 50 % поголема јачина на истегнување во однос на стандардните Е-стаклените влакна. Поради високата цена, овие стаклени влакна имаат ограничена апликација и се користат само за специјални цели каде се бара многу висока термичка издржливост и јачина. Терминот високоперформансни стакла се користи за да се карактеризираат овие стаклени влакна. Во Табела 4 се претставени некои од најзначајните физички и механички својства на стаклените влакна.

Отпорноста на дејството на влагата им е одлична, тие не бабрат, не се издолжуваат, не се распаѓаат и не трпат никакви хемиски промени кога се влажни. Со исклучок на дејството на јаките бази и флуороводородната киселина, имаат одлична корозивна отпорност [4, 6, 11].

Табела 2.4.: Физички и механички особини на стаклени влакна

Table 2.4.: Physical and mechanical properties of glass fibers

Влакно / Fibers	Густина / Density, g/cm ³	Јачина на истегнување / Tensile Strength, МПа	Модул / Modulus, Гра	Издолжување при прекин / Elongation at break, %	Точка на омекнување / Point of softening, °C
Е	2,54	3100-3800	76-78	4,5-4,9	830-860
Е - без бор	2,62	2100-3800	80-81	4,6	916
Д	2,16	2410	-	-	970
С	2,48	4380-4590	88-91	5,4-5,8	760

Електрични својства

По природа, стаклото е природен електроизолационен материјал. Електричните особини на стаклените влакна имаат значаен придонес за високите перформанси на композитот во електричните апликации. „Е“ стаклото е развиено да го подобрува електричниот отпор на пресуваните финални делови. „D“ стаклото има супериорни електрични особини во однос на „Е“ стаклото.

Првото стакло што било специјално развиено за производство на континуирани филаменти било алуминиум-бор-силикатното (или безалкалното), примарно наменето за електроизолација. Означено како Е стакло, тоа се покажало како добро прилагодливо за низа технолошки процеси и производи, од декоративни до структурни апликации, така што станува познато како стандардно текстилно стакло. Од целокупното производство на континуирано стакло, денес најголем дел отпаѓа на Е стаклото. Неговиот состав може да варира, но промените во означениот опсег немаат влијание врз неговите електрични и механички особини [4, 12, 13].

Првата значајна комерцијална примена на стаклени влакна е за филтрација на воздухот. Стаклените влакна доминираат на пазарот веќе неколку децении. Иако во последната деценија пониските трошоци на органските полимерни влакна ги заменија стаклените влакна во повеќето системи за филтрација на воздухот во зградите и комерцијалните апликации, пазарот за топлинска изолација продолжува да расте, воден од желба за енергетски поефикасни згради. Овој пазар е, всушност, и најголем корисник (по маса) на стаклени влакна од сите видови. Енергијата потребна за производство на производи од стаклени влакна за топлинска изолација е помала во споредба со енергијата која може да се заштеди за греење / ладење на еден простор во текот на неколку години. Стаклената волна денес претставува еден од најпознатите енергетски ефикасни производи за широка потрошувачка на пазарот.

Вториот по големина пазар (по маса) на стаклените влакна е нивната примена како зајакнувачка компонента во композитните материјали. Речиси со 90 % учествуваат како зајакнувачи на терморективните смоли. Се применуваат

во вид на ровинг (континуирани струкови), сечкани струкови, ткаенини, мат (врз база на континуирани и сечкани влакна) и во мелена форма. Јачината и модулот на еластичност на стаклените влакна се многу повисоки од оние на полимерната матрица.

Во автомобилската индустрија стаклените влакна се користат за производство на трансмисиони ремени, профили, гуртни за кочници, ламели, изолација на автомобилите и други делови од каросеријата. Исто така, се користат за производство на спортски реквизити како што се стапови за хокеј, скии, штици за сурфање, скии за вода, како и за изработка на кајаци, чамци и други компоненти за бродови.

2.2.2. Полимерна матрица за композити (Polymer matrix)

Полимерите, полимерните смеси, полимерните композити и наполнетите полимери ја претставуваат основата на науката за полимерни материјали. Како што е општо познато, развојот на човештвото минувал низ неколку важни епохи (камено, бронзено и железно време). Сега живееме во времето на полимерите, што е потврдено и од економски аспект, бидејќи развојот на полимерното производство е за 15-20 % поинтензивно од развојот на металната индустрија. Таквото огромно производство ја наметнува потребата од подобрување на квалитетот на полимерните производи и од проширување на областа на нивната примена, бидејќи дури и мали подобрувања (на пример, продолжување на векот на полимерните производи) се особено важни од економски аспект.

Полимерите главно се добиваат од земен гас или од сурова нафта од кои, по обработката и рафинирањето, се добиваат мономерите кои потоа се користат за производство на полимерите. Може да се применат различни постапки за добивање на полимерите.

Полимерната матрица 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, адхезијата 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.

Некој својства на матрицата кои најмногу влијаат на однесувањето на композитот се:

- Модул на еластичност (тврдина);
- Јачина на истегнување, компресиона, на смолкнување;
- Гранично издолжување;
- Отпорност на агресивни органски течности;
- Отпорност на кршење (жилавост) и толеранцијата на оштетување;
- Термичка и оксидациона стабилност и влаговпивање.

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

Термопластичните полимерни матрици при загревање омекнуваат или се топат, а при ладње повторно се втврдуваат. Овој процес може да биде често повторуван, при што во полимерот не се случуваат никакви хемиски промени. Типични термопласти се полиамид - PA, полипропилен - PP и ABS.

Термореактивните полимери содржат молекули кои се вмрежени и при загревање не омекнуваат. Термореактивните полимерни матрици се формираат при реакција, во која смолата и вцврснувачот или смолата и катализаторот се мешаат и потоа трпат иреверзибилна хемиска реакција. По вмрежувањето, кое најчесто се изведува на покачени 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 полиестерите и епоксидите) се вмрежуваат без издвојување испарливи супстанции како нус продукт и тие се многу полесни за процесирање (адисии реакции). Еднаш вмрежените термореактивни полимери не можат да преминат повторно во течност при загревање, поради што над одредена температура нивните механички својства значително се менуваат. Оваа температура е позната како температура на стаклосување (Glass Transition Temperature T_g); T_g варира широко за различни полимерни системи. Над T_g , молекулската структура на термореактивната смола се менува: од крут полимер минува во пофлексибилен, аморфен полимер. Над T_g модулот на смолата нагло опаѓа и како резултат на тоа јачината на притисок и смолкнување на композитите исто така опаѓа. Другите својства, како што се отпорност на вода и стабилност на боја, се редуцирани над T_g на смолата [7, 8, 14].

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

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

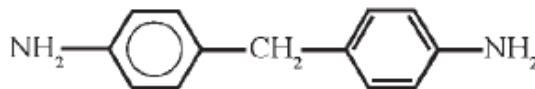
- Добри механички својства;
- Добри адхезиони својства;
- Добри својства на жилавост;
- Добра постојаност на атмосферски влијанија.

Кога се оценува погодноста на даден полимер за композит со специфична намена, битни параметрите при употреба на истиот се: температура, време, напрегања, влага, хемиски ефекти и сл. Покрај тоа, предисторијата и условите на процесирање на полимерот можат да влијаат на својствата на композитот. На

пример, порите, меѓуфазното поврзување, заостанатите напрегања и морфологијата, можат во широки граници да ги менуваат својствата на еден ист композит [8, 15, 16].

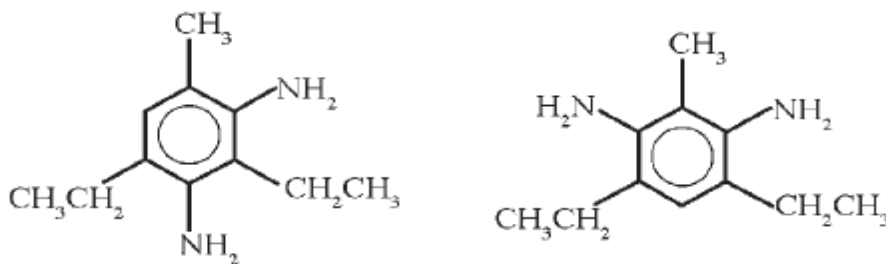
2.2.2.1. Епоксидни смоли (Epoxy resin)

Епоксидните смоли се класа на разновидни полимерни термореактивни материјали кои се карактеризираат со присуството на два или повеќе циклични прстени во нивната молекуларна структура. Како и останатите термореактивни смоли и тие исто така се вмрежуваат со примена на различни вмрежувачки агенси како што се: амини, анхидриди, тиоли и др. Амините се најчесто користени вмрежувачки агенси поради подобрата контрола на епокси-амино реакциите. Хемиските структури на некои од најчесто применуваните вмрежувачки агенси се претставени на Слика 2.11: триетилен тетрамин (ТЕТА), 4,4' диамино дифенил метан (DDM), 4,4' диамино дифенил сулфон (DDS), диетил толуен диамин (DETDA).



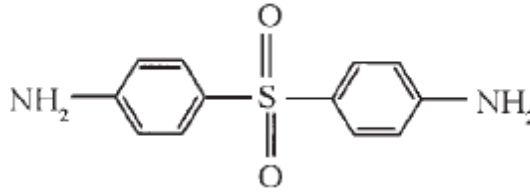
Диамино дифенил метан (DDM)

Diamino diphenyl methane (DDM)



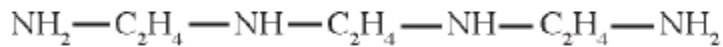
Диетил толуен диамин (DETDA)

Diethyl toluene diamine (DETDA)



Диетил толуен диамин (DDS)

Diethyl toluene diamine (DDS)



Триетилен тетрамин (TETA)

Triethylene tetramine (TETA)

Слика 2.5.: Хемиски структури на некои од најчесто применуваните вмрежувачки агенси

Figure 2.5.: Chemical structures of commonly used curing agents

Големата примена на епоксидните смоли се должи на можноста епоксидните групи да стапуваат во различни хемиски реакции и, пред сè, на нивните корисни својства, како што се високата јачина, ниската вискозност, одличната корозивна отпорност, постојаноста на високи температури и соодветните електрични својства. Епоксидните смоли претставуваат многу често применувана полимерна матрица за добивање на композитни материјали, а посебно наоѓаат примена во воздухопловната индустрија, поради нивната лесна обработка, добрите механички својства, како и поволната цена. Тие се термореактивни и инертни системи на смола од кои може да се добие добра комбинација на високи механички и електрични својства. Тие можат да се користат и на температура од 180-270°C. Нивната јачина на истегнување може да биде до 83 МПа, цврстина по Rockwell M110 и издолжување од 2-5 %. Епоксидните смоли исто така имаат и висока отпорност кон растворувачи, масла и хемикалии.

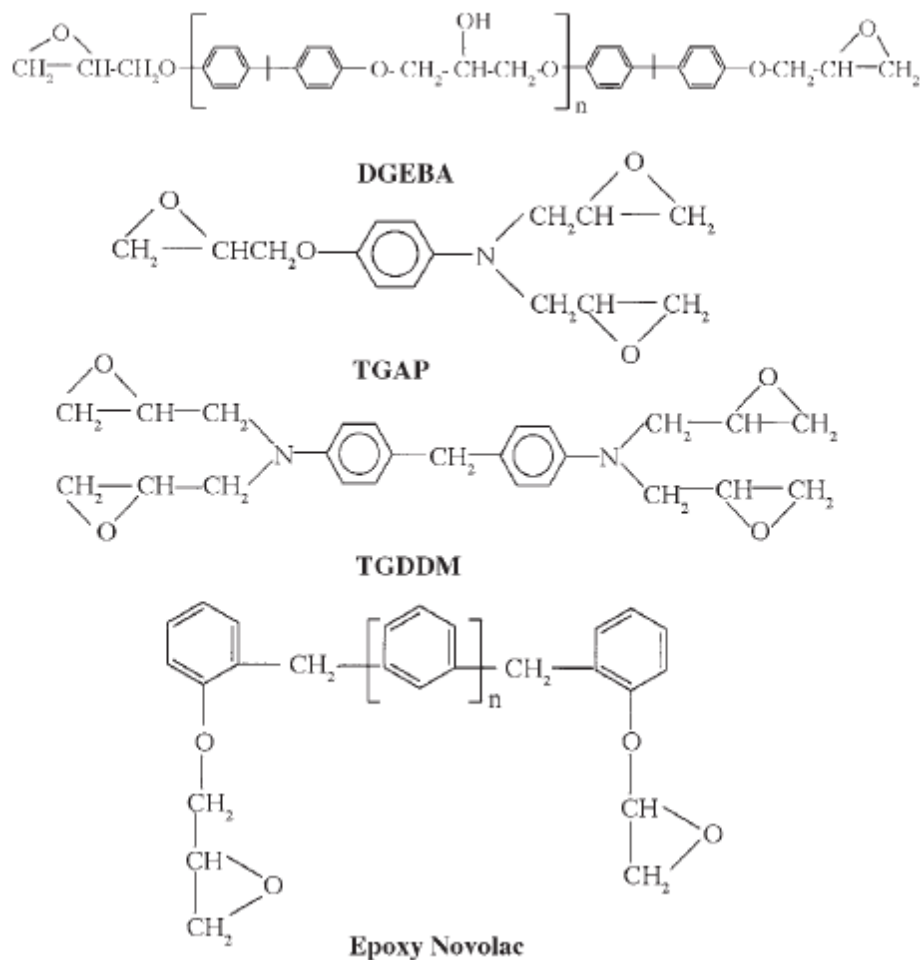
Епоксидните смоли се издвојуваат помеѓу останатите термореактивните смоли поради неколку фактори (14, 16, 17), имено:

- Потребен е минимален притисок за изработка на производите за кој вообичаено се користат термореактивни смоли;

- Собирањето е многу мало и поради тоа помали се и заостанатите напрегања во вмрежениот производ во споредба со полимеризацијата на винил кој се користи за вмрежување на незаситени полиестерски смоли;
- Употреба на широк спектар на температури со внимателна селекција на вмрежувачки агенси и добра контрола над степенот на вкрстено поврзување;
- Достапноста на смолите од нисковискозна течност до цврста нелеплива состојба, итн.;
- Епоксидните смоли имаат широка примена за добивање на структурни лепила, површинските облоги, инженерски композитни материјали и електроизолациони ламинати.

Најчесто употребуваната епоксидна смола е таа која се карактеризира со присуство на две епоксидни групи (DGEBA). Мултифункционални епоксидни смоли со три или четири функционални групи се исто така достапни. Хемиските структури на дифункционалната и мултифункционалните епоксидни смоли како што се епокси новолак (Dow DEN 438), тетраглицидил етер од 4,4' - диамино дифенил метан (TGDDM), триглицидил p-амино фенол (TGAP), се прикажани на Слика 2.12.

Хемиската природа и количината на употребени вмрежувачки агенси играат важна улога во определувањето на термомеханичките својства на вмрежените полимери. Широк спектар на својства како и материјали за екстремни апликации можат да се добијат со употреба на истите смоли, преку внимателна селекција на вмрежувачки агенси. На пример, кога за вмрежување на DGEBA, се користи ароматичен амин, се добива смолен систем со висока температура на стаклосување (T_g) која може да се користи за високотемпературни композитни апликации, додека, ако се користи Jeffamine (M5, 6, 18). $M_n > 800 \text{g/mole}$), како вмрежувачки агенс се создава флексибилна мрежа, која може да се користи за апликациите со вибрациона амортизација (5, 6, 14).



Слика 2.6.: Хемиски структури на функционални и мултифункционални епоксиди

Figure 2.6.: Chemical structures of functional and multifunctional epoxies

Епоксидни матрици со високи вредности за T_g можат да се добијат со употреба на ароматски вмрежувачки агенси како DDM, DDS, DETDA. Предноста на DETDA над другите е што е во течна состојба и нуди подобра процесибилност. T_g може понатаму да се зголемува со употреба на смола со висока функционалност. Термички стабилни смоли со високи перформанси се неопходни за композитни структури кои се користат во авионската индустрија. Полиамидните и цијано естерските смоли наоѓаат широка примена за изработка на надворешни структурни компоненти. Конвенционалните епоксидни смоли генерално не се соодветни за апликации во авионската индустрија. Сепак, мултифункционалните

епоксидни смоли вмрежени со примена на соодветни ароматични амини, можат да понудат подобра термичка стабилност во споредба со полиамидите.

Голем број на композити може да се добијат со користење на епоксидните смоли како матрица (Табела 2.9). Тие може широко да се групираат во следниве три групи: композити зајакнати со влакна (FRP), композитите зајакнати со честици и нанокмозити [4, 6, 8, 14, 16].

FRP епоксидните композити може да се добијат со внимателна селекција на составот на смолата, влакната и дизајнирање на интерфејсот меѓу нив. FRP композитите наоѓаат примена во авионската, автомобилската индустрија и други (14-18). FRP епоксидните композитите (за генерална употреба) се направени со техника на влажно положување и последователно пресување во калап. Слични ламинирани композити, произведени со пресување со пренос на смолата (RTM), нудат помали трошоци, здравствени и безбедносни придобивки.

Полимерните композити врз база на епоксидни смоли се познати по високата осетливост на внатрешни оштетувања поради кршливоста на вмрежената смола, што може да доведе до нарушување на безбедноста и проблеми со постојаноста [14, 15]. Поради тоа, за апликации со високи перформанси, подобрувањето на толеранцијата на оштетување на епоксидните композити е неопходна и претставува предмет на истражување [16, 17].

Табела 2.5.: Различни видови на епоксидни композити и процес на производство

Table 2.5.: Various types of epoxy composites and the manufacturing processes

Композити / Composites	Зајакнувач / Reinforcement	Процес / Process
-----------------------------------	---------------------------------------	-----------------------------

Полимерни композити зајакнати со влакна	Стаклени влакна, јаглеродни влакна, кевлар влакна, базалт влакна	Влажно положување и пресување во калап, положување на препрегот со вакуум и вмрежување во автоклав, намотување на филаменти со вмрежување во печка (FW), пултрузија, пресување со пренос на смолата (RTM), структурно реакционо инјекционо пресување
Микро-композити зајакнати со честици	Силициум, сецкани јаглеродни влакна, калциум карбонат, сецкани стаклени влакна, силициум карбид	Механичко мешање и леење, пресување во калап
Наноккомпозити	Наносилициум, нанокалциум, јаглериоди нановлакна, јаглеродни наноцевки	Механичко мешање со ултразвук, леење или пресување во калап

2.3. Споредба на композитите со конвенционалните материјали (Comparison of composites with conventional materials)

Инжењерот 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 композитите и конвенционалните материјали, како што се алуминиумските и железните легури, е таа што композитите се типично

анизотропни материјали. Карактеристиките на композитните материјали се различни во различни насоки на материјалот и може да варираат во широк интервал на вредности. Кај композитите е отворена можноста технологот да состави материјал кој ќе одговара на потребите за соодветна крутост и јакост за одредена намена. Имено, одредени карактеристики на композитот може да се менуваат во зависност од потребите и условите на експлоатација. За разлика од композитите, конвенционалните материјали се изотропни и тие имаат идентични својства (на пример, крутост и јакост) во сите насоки.

Делот од волуменот на композитот зафатен со влакната го дефинира волуменскиот удел на влакната (fiber volume fraction), V_f , додека делот од волуменот зафатен со матрицата – е волуменски удел на матрицата (matrix volume fraction), V_m . Ако се претпостави дека композитот не содржи внатрешни пори, тогаш е задоволен условот, $V_f + V_m = 1$. Во тој случај, за познат волуменски удел на влакна, јакоста и крутоста на композитот се пресметува од едноставни релации според правилото на смеси (rule of mixture).

Според тоа, ако ги знаеме карактеристиките на зајакнувачот и матрицата, аналогно на ова правило можеме брзо да ги пресметаме карактеристиките на композитот. И ако знаеме колку е соодносот на зајакнувач / матрица дали 60 со 40 % или 70 со 30 % и т.н., може да се пресмета:

$$F_c = V_f F_f + (1 - V_f) F_m$$

- F_c ; F_f ; F_m - јакост на композитот, влакното и матрицата во насока на влакното.

$$E_c = E_f V_f + (1 - V_f) E_m$$

- E_c ; E_f ; E_m - крутости на композитот, влакното и матрицата во насока на влакното;

- Густината на композитот зајакнат со влакна се одредува со примена на правилото на смеси, каде што V_m е волуменски удел на матрица, V_f е волуменски удел на влакна, ρ_m е густина на матрица и ρ_f е густина на влакна.

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m$$

При споредба на композитните материјали со конвенционалните метални легури треба да бидат земени предвид и други фактори. Иако специфичната јакост и крутост се многу важни фактори, композитите нудат и други предности. На пример, отпорот на замор на материјалот (fatigue resistance) и „damping“ - карактеристиките кај композитите се далеку подобри од оние на металите. Отпорот на корозија на композитните материјали овозможува нивно долготрајно користење во средини, во кои металите имаат краток век поради корозија. Композитите можат да содржат помалку компонентни делови и да бидат поевтини и посигурни од металните структури. Од друга страна, пак, композитните материјали имаат и некои свои недостатоци во споредба со металите. Механичките карактеристики на композитните материјали на база на полимери опаѓаат драстично на високи температури, или во случаи на долготрајна изложеност на влага, масла, горива или други јаглехидрати [7, 8].

2.4. Технологија на рачно импрегнирање (Hand lay-up technology)

Рачното импрегнирање е најчестиот и најевтиниот начин на отворен калап, бидејќи бара најмалку количество опрема. Техниката рачно импрегнирање е наједноставниот метод за добивање на композитни структури. Исто така, овој метод бара минимално поседување на опрема. Чекорите за обработка се прилично едноставни. Прво, површината на калапот се прска со гел за ослободување, со цел да се избегне лепење на полимер на самата површина. Понекогаш се користат тенки пластични плочи на врвот и на дното од калапот, за да се добие добра завршна површина на производот. Зајакнувачкиот материјал може да биде во форма на ткаенина или на сецкани влакна, како што е прикажано, тој се сече според големината на калапот и се поставува на неговата површина. Потоа терморезактивниот полимер во течна форма се меша темелно во соодветна пропорција со пропишаниот катализатор (средство за вмрежување) и се истура на површината на веќе поставениот зајакнувачки материјал во калапот. Полимерот подеднакво се шири насекаде со помош на четка или валјак. Потоа се става втор слој на зајакнувачки материјал на полимерната површина и со помош на ролерот се поминува со благ притисок за да се отстрани заробениот воздух,

како и вишокот на полимер. Процесот се повторува за секој нареден слој на полимер и зајакнувач, сè до потребниот број слоеви. По вмрежувањето на собна температура или на одредена температура, развиениот композитен дел се зема и понатаму се дообработува, или пак се вршат негови испитувања. Шемата за рачно импрегнирање е прикажана подолу на сликата. Времето на вмрежување зависи од типот на полимер кој се користи за изработка на композитот. На пример, за систем базиран на епоксидна смола, нормалното време на стврднување на собна температура е 24-48 часа. Капиталните и инфраструктурните барање се помали во споредба со другите методи на производство на композитни материјали. Стапката на производство е помала, така што тешко е да се постигне масовно производство за изработка на овие композити. Пронаоѓањето на методот Рачно импрегнирање има примена во многу области како што се: за авионски компоненти, автомобилски делови, трупови за брод, изработка на палуба, производство на стандардни ветерни турбини, производство на чамци, архитектонски лајсни и сл.

Материјалите што се користат за изработка на овие композити преку методот Рачно импрегнирањесе дадени во табелата подолу.

Табела 2.6.: Суровини кои се употребуваат во технологијата на рачно импрегнирање

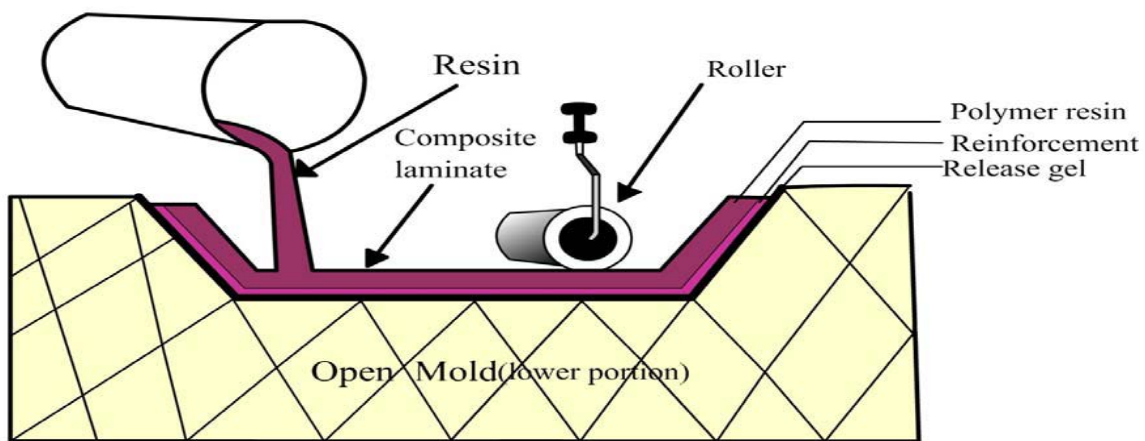
Table 2.6.: Raw materials used in hand lay-up method

Матрица	Епоксид, полиестер, поливинил естер, фенолна смола, незаситен полиестер, полиуретанска смола
Зајакнувач	Стаклени влакна, јаглородни влакна, арамидни влакна, природни растителни влакна (сисал, банана, коприва, коноп, лен итн.) (сите овие влакна можат да бидат во форма на еднонасочна лента, или двонасочнен материјал

	МАТ, во форма на ткаенина, МАТ на случајно ориентиранни влакна)
--	---

Сите горенаведени зајакнувачки влакна се користат кај овој метод на производство на композити. Но, одредени арамидни ткаенини многу тешко можат да се импрегнираат со помош на оваа техника, поради слабата пенетрација на смолата во ткаенина.

Hand Lay-Up



Слика 2.7.: Технологија на рачно импрегнирање

Figure 2.7.: Hand lay-up method

Смолата се импрегнира рачно врз влакната кои, како што видовме, можат да бидат во форма на ткаенина, плетенина, или неткаен текстил (мат). Ламинатите се оставаат да се вмрежат под стандардни атмосферски услови.

Рачното импрегнирање е наједноставниот метод за леене на композити, нудејќи ниски трошоци за обработка, при што едноставната обработка нуди широк спектар на големини на деловите. Минималната инвестиција во опремата, во комбинација со квалификувани оператори, овозможува добра стапка на производство и конзистентен квалитет.

Главни предности:

- Ниска цена за набавка на опремата;
- Едноставни принципи за учење;

- Ниска цена на чинење на готовиот композит, особено ако се користи смола за вмрежување на собна температура;
- Широк избор на добавувачи и материјали;
- Поголема содржина на влакна и подолги влакна отколку кај импрегнирањето со спреј.

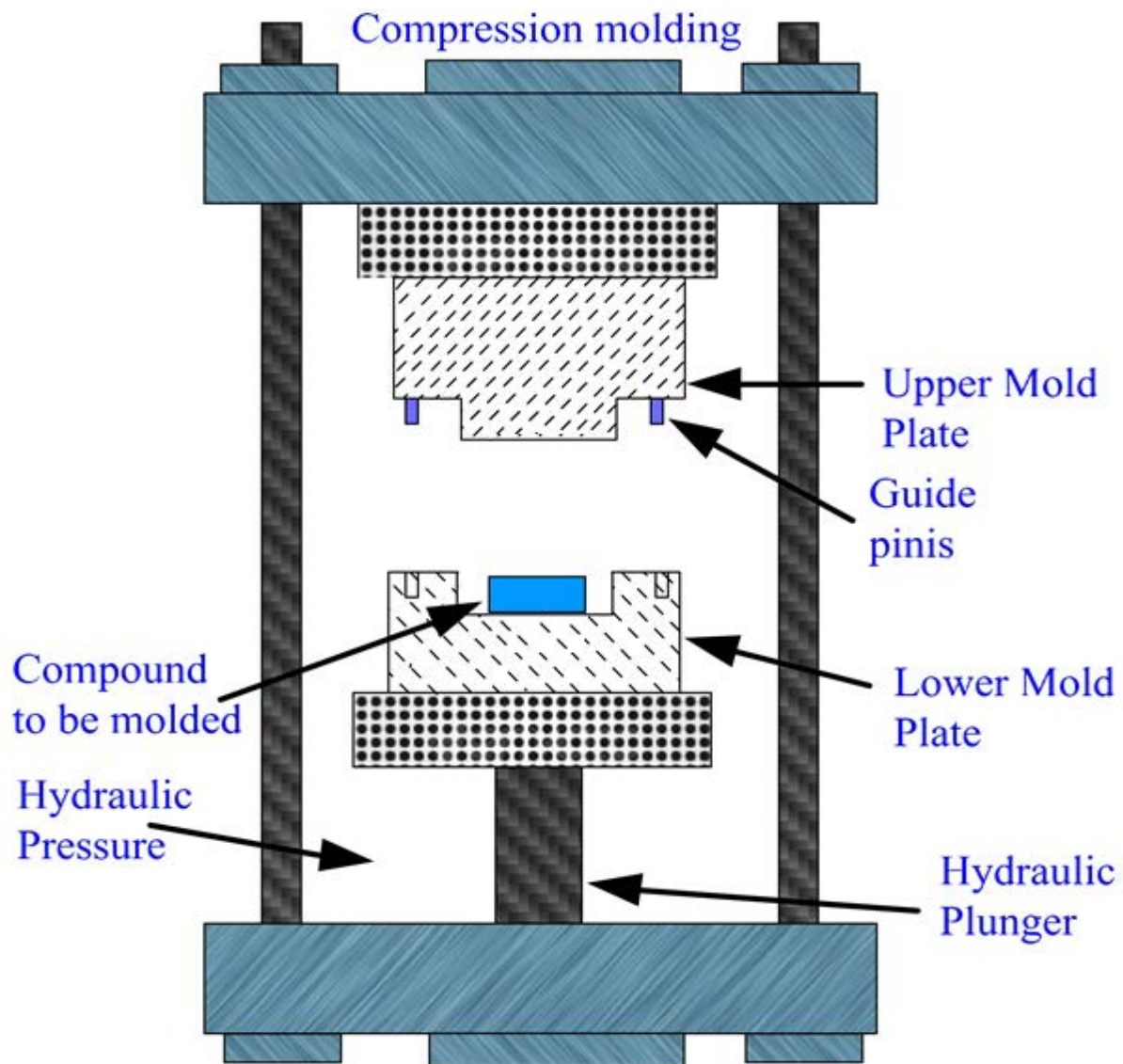
Недостатоци:

- Мешањето на смолата, содржина на ламинатната смола и квалитет на ламинатот многу зависи од вештината на операторите;
- Здравствени и безбедносни причини за смолите. Помалата молекуларна тежина на смолата генерално значи дека има потенцијал да биде поштетна од производите со повисока молекуларна тежина. Малиот вискозитет на смолата, исто така, значи дека таа има зголемена тенденција да навлезе во облеката на операторот;
- Ограничувањето на концентрациите на стирол во воздухот до законско ниво од полиестер и винилестер станува сè потешко без скапи системи за екстракција;
- Смолата треба да има мал вискозитет за да може да се употребува рачно. Ова генерално ги компромитира нивните механички / топлински својства поради потребата за ниво на разредувач / стирен [20].

2.5.Технологија на компресионо пресување (Compression molding)

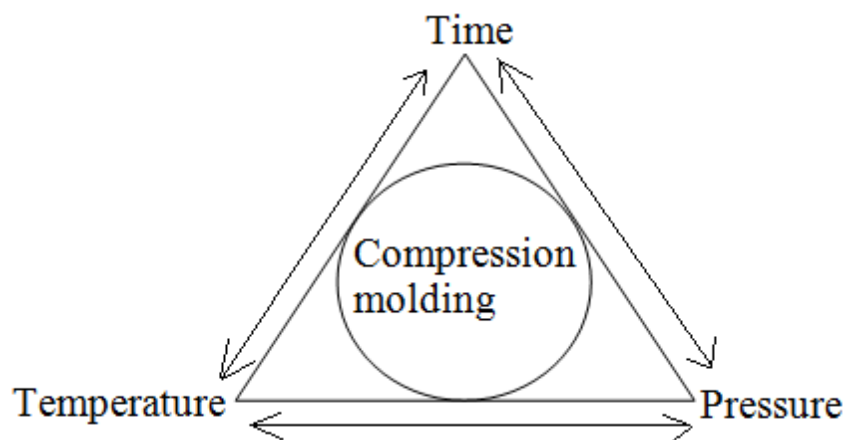
Компресионото пресување е добро позната техника за развој на различни композитни производи. Тоа е затворен процес на лиење со примена на висок притисок. Во овој метод, како што е прикажано на сликата подолу, за производство на композитен производ се користи метален калап составен од два дела. Кај оваа преса подлогата, односно долниот дел од калапот е неподвижен, а горната плоча е подвижна. Зајакнувачот и матрицата се ставаат во металниот калап и заедно се чуваат помеѓу мембраната за компресија. Топлината и притисокот се применуваат за одреден период според условот на композитот. Материјалот кој се наоѓа во калапот, поради истовремена примена на притисок и

топлина почнува да тече и да го следи обликот и формата на шуплина на калапот, со висока димензионална точност, што зависи од дизајнот на калапот. Вмрежувањето на композитот може да се врши или на собна температура или на некоја покачена температура. По вмрежувањето, калапот се отвора и композитниот производ се отстранува од калапот по што следи понатамошна обработка. Во принцип, машината за компресионо пресување е во вид на печатар кој е вертикално ориентиран со две половини на калапот (половина и дно). За примена на притисокот кај компресионото пресување се употребува хидрауличен механизам. Контролните параметри во Методот на компресионо пресување за развивање на супериорни и посакувани својства на композитот се прикажани на сликата подолу. Сите три димензии на моделот (притисок, температура и време на примена) се важни и мора да се оптимизираат ефикасно за да се постигне задоволувачки композитен производ, бидејќи секоја димензија на моделот е еднакво важна. Доколку применетиот притисок не е доволен, тоа ќе доведе до слаб интерфејс и адхезија на релација влакно - матрица. Ако притисокот е превисок, може да предизвика оштетување на влакната. Ако температурата е премногу висока, својствата на влакната и матрицата можат да се променат. Ако температурата е пониска отколку што е потребно, влакната можат да не бидат доволно натопени со смолата поради високиот вискозитет на полимерот, особено ова важи за термопластичните матрици. Ако времето на примена на овие фактори (притисок и температура) не е доволно, може да се предизвика кој било дефект поврзан со недоволен притисок или температура. Другите фактори на производство, како што се видното греење на калапот, стапката на затворање на двете половинки на калапот и времето на деформирање, исто така влијаат врз процесот на производство. Суровините што се користат за изработка на композити преку процесот компресионо пресување, се дадени во табелата подолу.



Слика 2.8.: Технологија на компресионо пресување

Figure 2.8.: Compression molding method



Слика 2.9.: Критични процесни параметри на методот Компресионо пресување
Figure 2.9.: Critical process parameters of compression molding method

Пресувањето во калап претставува една од поважните технологии за добивање полимерни композитни материјали. Кога како зајакнувачи се користат природни влакна, постојат неколку различни начини на пресување во калап. Генерално, разликите се во начинот на комбинирање на влакната и полимерната матрица и нивното внесување во калапот. Во некои процеси се применува мат од природни влакна и термопластична матрица кои во калапот се внесуваат преку екструдер во облик на растоп (на пример, EXPRESS процесот), во други пак во калапот се внесува мат од термопластична матрица зајакната со природни влакна, мат од терморективна матрица зајакната со природни влакна или хибриден мат од влакна на полимерот и природни влакна, а понекогаш се користи и прашкаст полимер кој се додава во влакнестиот мат пред пресување во калапот. Бидејќи најчесто во сите опции влакната се применуваат во облик на мат, сечкањето на влакната и процесирањето на матовите е основно барање при постапката на пресување во калапи.

Примена:

1. Методот е подеднакво применлив и за терморективни и за термопластични полимерни матрици за композити;
2. Многу широк спектар на апликации кои се движат од кујнски производи до автомобили, играчки, електрични апарати и делови на авионот;
3. Типични производи вклучуваат автомобилски панели, покриви, батериски подлоги, браници, капи, спојлери, мебел, кујнски чинии и пепелници, копчиња, големи контејнери, медицинска опрема (ултразвучна опрема) и сл.

Табела 2.7.: Суровини кои се користат во процесот на компресионо пресување
Table 2.7.: Raw materials used in the compression molding process

	Терморективна: епоксидна, полиестер,
--	--------------------------------------

<p>Матрица</p>	<p>поливинил естер, фенолна смола. Незаситен полиестер, полиуретанска смола, уреа формалдехид. Термопластични: полипропилен (ПП), полиетилен (ПЕ), најлон, поликарбонат (РС), поливинил хлорид (PVC), целулоза ацетат, полиетерхер кетон (PEEK), акрилонитрил-бутадиен-стирен (ABS), полистирен (ПС) биоразградливи полимери како полилактична киселина (PLA), поливинил алкохол (ПВА), пластика базирана на соја, полимери на база на скроб, итн.</p>
<p>Зајакнувачки материјал</p>	<p>Стаклени влакна, јаглеродни влакна, арамидни влакна, природни растителни влакна (сисал, банана, коприва, коноп, лен итн.) (сите овие влакна може да бидат во форма на еднонасочни ленти, двонасочен (ткаен материјал) МАТ, во форма на ткаенина, МАТ на случајно ориентирани влакна, кратки влакна, исечени влакна).</p>

Предности на процесот на компресија на калапи:

1. Стапката на производство е висока, бидејќи времето на циклусот е неколку минути;
2. Може да се постигне добра завршна површина со различна текстура и стил;

3. Со овој процес на компресионо пресување се постигнува голема (висока) униформност на производите;
4. Можна е добра флексибилност во дизајнот на делот;
5. Дополнителни додатоци како инсерти, шевови и сл., можат да се вметнуваат за време на изработката на деловите;
6. Отпадот од суровини е минимален;
7. Трошоците за одржување се ниски;
8. Свиткување и намалување на производот е речиси невозможно, па димензионалната точност е многу добра.

Недостатоци на процесот на компресија:

1. Поради скапата машинерија и скапите делови, почетната капитална инвестиција поврзана со компресионо пресување во калап е висока;
2. Процесот е погоден за висок обем на производство. Тоа не е економично за правење на мал број на делови или за прототипови;
3. Тоа е трудоинтензивен процес;
4. Понекогаш се бара и секундарна обработка (отстранување на вишокот материјал) кај технологијата компресионо пресување;
5. Понекогаш се појавуваат нерамни линии кај разделувањето помеѓу двете плочи од калапот;
6. Постои ограничување на длабочината на калапот.

При пресување во калап постојат шест значајни фактори кои инженерот треба да ги има на ум:

- * Утврдување соодветна количина на материјал;
- * Утврдување минимална количина на енергија потребни за загревање на материјалот;
- * Утврдување на минималното време потребно за загревање на материјалот;
- * Утврдување соодветна техника за загревање;

* Предвидување на потребната сила, за да се осигура добар спој помеѓу деловите од калапот;

* Избор на материјал за изработка на калапот кој ќе овозможи брзо ладење [19].

2.6. Дизајн на експерименти – краток историјат на експериментирањето (Design of experiments – brief history of experimentation)

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

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 во знакот на Роланд Фишер (Roland A. Fisher). Во текот на неговата пионерска работа при Rothmasted Experimental Station во близината на Лондон во 1920-те и раните 1930-ти години, тој 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, Фишер развива гледиште кое доведува до трите основни принципи на планираниот експеримент: рандомизација, репликација и блокирање.

Втората или *Индустриската ера* е катализирана од развојот на методологијата за одзивната површина од страна на Џорџ Бокс (George Box) и неговите соработници во 1951 г. 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 многу брзо, и (2) Експериментаторот многу брзо може да ги добие круцијалните 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 производен процес сè 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, за да се постигне оптималност. Овој пристап не наоѓа некоја голема примена заради недостаток на компјутерски алатки за негова имплементација.

Третата ера од статистичкиот дизајн е одбележана со работата на Геничи Тагучи (Genichi Taguchi) во доцните 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 нечувствителен на факторите од амбиентот (околината) или од други фактори кои тешко се контролираат;
- Правење производите да бидат нечувствителни 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 ги предложил факторните дизајни и вовел нови статистички методи. Како резултат на оваа работа, имало многу добри последици. Прво, примената на планирањето на експеримент се раширува и во дискретните делови од индустријата, како што е: автомобилската, авио, електрониката, индустријата за полупроводници, и многу други, кои претходно не ја користеле оваа техника.

Второ, четвртата ера на статистичкиот дизајн на експерименти почнува. Оваа ера се карактеризира со 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 Тагучиевите технички методи што овозможуваат неговиот инженерски концепт да биде спроведен во пракса ефикасно и ефективно, пред сè, 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 [27].

2.6.1. Постапка за дизајнирање на експерименти (Procedure for designing of experiments)

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.

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. Во многу случаи, полиномен модел од понизок ред се зема за соодветен. Моделот од прв ред со две варијабли е:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon$$

каде y е одзивот, x -овите се факторите, со a е означен непознат параметар кој ќе биде одреден од податоците на експериментот и ε е експерименталната грешка на системот која 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.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon$$

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:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \varepsilon$$

Моделите од втор ред често се користат кај оптимизационите експерименти.

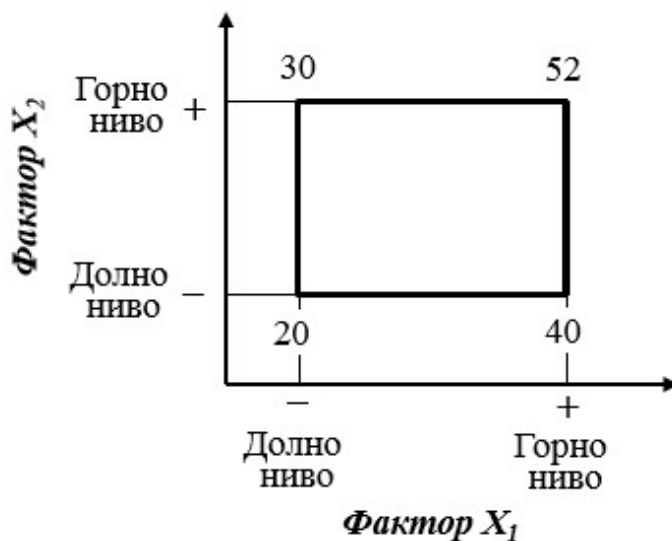
Препорачливо е пред да се изведе експериментот да се направи пробно изведување. Овие проби даваат корисни информации за конзистентноста на експерименталниот материјал, функционирањето на мерниот систем, груба идеја за експерименталната грешка и шанса да се извежба целата експериментална процедура [23-27].

2.6.2. Факторен дизајн (Factorial design)

Факторните дизајни се многу ефикасни за експериментите и вклучуваат проучување на ефектите на два или повеќе фактори. Ако во еден експеримент се испитани сите можни комбинации на фактори се нарекува *факторен дизајн*.

Пример: ако имаме **a** нивоа на факторот X_1 и **b** нивоа на факторот X_2 комплетниот експеримент ќе ги содржи сите **ab** комбинации. Ефектот на факторот го дефинираме како промена на одзивот поради промената на факторот.

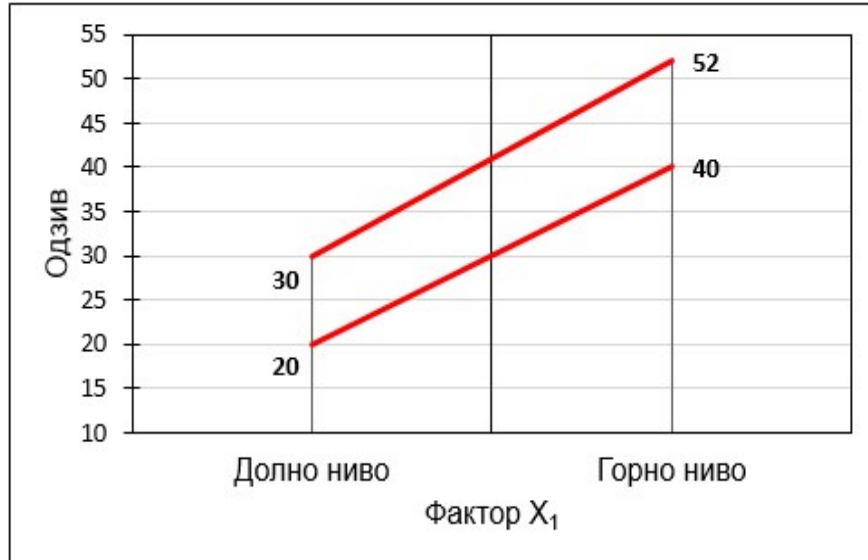
На Сликата 2.5 што претставува двофакторен експеримент со два фактори и две нивоа. Овие нивоа се нарекуваат „долно“ и „горно“ и се означуваат со „-“ и „+“ соодветно. Во овој двофакторен дизајн главниот ефект на факторот X_1 се набљудува како разлика на средниот (просечниот) одзив на долното ниво од X_1 и средниот одзив на горното ниво од X_1 . Тоа важи и за факторот X_2 .



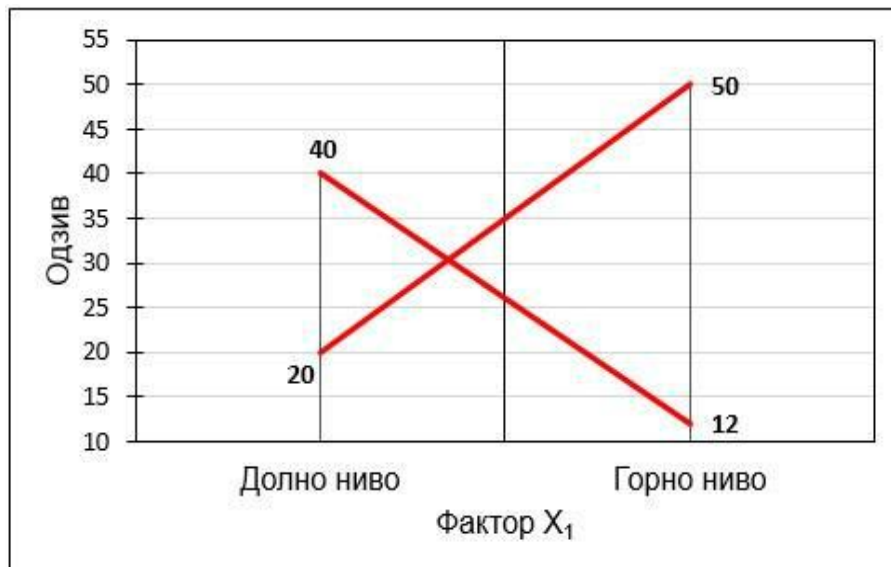
Слика 2.10.: Двофакторен експеримент

Figure 2.10.: A two-factorial experiment

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 прикаже како на Слика 2.6. Може да се забележи дека $-X_2$ и $+X_2$ линиите се речиси паралелни, што индицира непостојење на интеракција меѓу факторите X_1 и X_2 . Слично, на Сликата 2.7 се прикажани податоците од двофакторен 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 [28 - 34].



Слика 2.11.: Двофакторен експеримент без интеракција
 Figure 2.11.: Two-factorial experiment without interaction



Слика 2.12.: Двофакторен експеримент со интеракција
 Figure 2.12.: Two-factorial experiment with interaction

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН ДЕЛ (EXPERIMENTAL PART)

3.1. Материјали користени за експериментите

(Materials used for experiments)

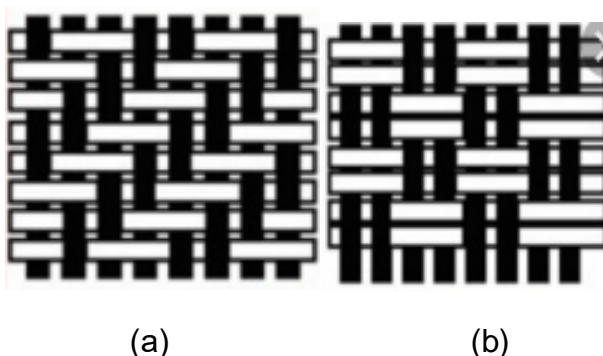
Во експериментите во овој магистерски труд се користени терморективенсмолен систем, течна епоксидна смола (DER 383) која е производ на реакцијата на епихлорохидрин и бисфенол А, и зацврстувач (Polyrox Н 766) како матрица и стаклени ткаенини како зајакнувачи. Во Табелата 3.1. и Табела 3.2 се наведени карактеристиките на стаклените ткаенини и карактеристиките на смолниот систем.

Табела 3.1.: Технички карактеристики на Е - стаклените ткаенини

Table 3.1.: Characteristics of glass fabrics

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

Во Табелата 3.1. претставени се техничките карактеристиките на стаклените ткаенини во кепер и панама преплет (twill and basket weave) дадени од производителот, кои ги користиме како зајакнувачи во добивањето на композитните плочи. На Слика 3.1 дадени се типот на преплет кај користените стаклени ткаенини.



Слика 3.1.: Кепер преплет (a), панама преплет (b)
Figure 3.1.: Twill weave (a), basketweave (b)

Во Табела 3.2. претставени се карактеристиките на смолниот систем дадени од производителот, користени како матрица во процесот. Епоксидна смола со тежина 176 – 183 g/eq, содржина на епоксид 5460-5680 mmol/kg, густина 1,16 g/ml и рок на траење 24 месеци, и карактеристиките на зацврстувачот во смолниот систем.

Табела 3.2.: Карактеристики на компонентите на смолниот систем

Table 3.2.: Characteristics of the components of the resin system

Ероху resin (D.E.R 383)/		Polypox H 766	
Ерохидна еквив. тежина (g/eq) (Епоксидна еквив. тежина)	176 – 183	Density at 25°C, [g/cm ³] (Густина)	0,94±0,05
Ерохидна Процент (%)	23,5 – 24,4	Viscosity at 25°C,	14

(Процент на епоксид)		[mPa s] (Вискозитет)	
Epoxy Group Content (Содржина на епоксид) (mmol/kg)	5460 – 5680	Colour (Боја)	blue
Color (Platinum Cobalt) (Боја)	125 Max.	H-equivalent weight [g/Equiv.] (еквивалентна тежина)	55
Viscosity @ 25°C (mPa•s) (Вискозитет)	9000 – 10500	Amine number [mg KOH/g] (број)	540 ± 15
Water Content (ppm) (Влажност)	700 Max.		
Density @ 25°C (g/ml) (Густина)	1,16		
Shelf Life (Months) (Рок на траење)	24		
Hydrolyzable Chlorine Content (ppm) (Содржина на хидролизиран хлор)	500 Max.		
Epichlorohydrin Content (ppm) (Содржина на епихлорохидрин)	5 Max.		

3.2. Добивање на препрег со рачна импрегнација

(Obtaining prepreg with hand lay-up impregnation)

Во овој магистерски труд, добивањето на препрезите е направено со импрегнација, односно рачно нанесување на полимерна матрица на двата типа стаклена ткаенина. Сите експерименти и добивањето на препрезите беше направено во лабораториите на Институтот за современи композити и роботика

во Прилеп. За добивање на препрегот за нашите испитување ни помогна долгогодишното практично искуство во областа на композитните материјали на Институтот. За добивање на препрезите беше користен двокомпонентен смолен систем (епоксидна смола и зацврстувач) чии што карактеристики се дадени погоре во Табелата 3.2, а истиот беше добиен со мешање на компонентите во сооднос 100:32. Врз основа на овој сооднос на смолата (D.E.R 383) и зацврстувачот (Polurox H 766), на лабораториска вага беа измерени соодветните количини и со постепено нивно мешање се доби двокомпонентната смеса.



Слика 3.2.: Двокомпонентна смеса

Figure 3.2.: Bicomponent mixture

Стаклените ткаенини исто така беа подготвени за рачно нанесување на полимерната матрица врз нивната површина, односно од нив беа пресечени правоаголни парчиња со димензија (250 x 200) mm. Двокомпонентната смеса се нанесува или се распределува на секое парче од текстилниот материјал, во нашиот случај стаклена ткаенина, со помош на рачен ролер. Нанесувањето на смолата се вршеше по следниот редослед: стаклена ткаенина, смола, стаклена ткаенина, смола итн.



Слика 3.3.: Нанесување на смола на примероците стаклена ткаенина и добивање на препрег

Figure 3.3.: Hand lay-up of resin on glass fabric samples and obtaining of prepreg

3.3. Производство на композитни плочи (Production of composite plates)

За добивање на композитни плочи беше применета технологијата на компресионо пресување на претходно добиените препрези. Горѐ добиените парчиња од стаклена ткаенина импрегнирани со смола, беа обвиткани со хартија (огноотпорна) и беа поставени во прес машината.

Притисок за пресување беше 14 и 18 kg/cm² на претходно одредена температура. Температурата во процесот на пресување постепено и рачно се зголемуваше, во период од еден час додека траеше пресувањето. Потоа, добиениот примерок се остави неколку часа да се исуши и добро да се соедини, при што добиените композитни плочи беа готови за нашите анализи.

Во овој магистерски труд беа направени композитни плочи зајакнати со стаклена ткаенина во различен преплет, па така добивме композитни плочи зајакнати со кепер стаклена ткаенина, како и плочи со панама стаклена ткаенина.



Слика 3.4.: Прес машина

Figure 3.4.: Press machine

3.4. Планирање и дизајн на експеримент (Planning and design of an experiment)

При изведувањето на некој експеримент ние намерно менуваме една или повеќе процесни варијабли (или фактори) со цел да видиме 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 [23-25].

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.

Со цел да се изврши дизајнирање на процесот за добивање на композитни плочи, користен е Методот на планиран експеримент кој што претставува

ефикасен метод и овозможува добивање на максимални информации од минималниот износ на експерименти.

Врз основа на практично искуство како и од литературни сознанија, избрани се два фактори кои најмногу влијаат на карактеристиките на композитните плочи, а тоа се: типот на преплет на ткаенината користена за зајакнувач, и притисокот на пресување. Процесот кој зависи од два фактори, x_1 , x_2 и кога секој фактор има две нивоа, претставува дизајн кој е наречен **2^2 факторен дизајн**. Минималниот број на експерименти кои треба да се направат е:

$$N = 2^2 = 4$$

Во рамките на оваа магистерска работа користен е двофакторен експериментален дизајн, со варирање на два фактори на две нивоа:

- Тип на ткаенина (x_1) – кепер зајакнувачка ткаенина и панама зајакнувачка ткаенина и
- Притисок (x_2) – со минимален притисок 14 kg/cm^2 , а максимален притисок 18 kg/cm^2 .

Составување на план матрицата на експериментот се врши на следниов начин:

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

Согласно план – матрицата (Табела 3.3), изведени се четири експерименти со варирање на нивото на двата параметри.

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.

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

Претпоставениот модел од прв ред за процесот на обликување под притисок на композитни плочи е:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2$$

За 2^2 сефакторен експеримент потребни се 4 тестови ($N=2^2=4$), а секој тест е со различна комбинација на факторите и нивоата. Со оглед на тоа дека за секоја комбинација се направени 3 теста (3 реплики), вкупно се извршени 12 тестови.

Табела 3.3.: План матрица на експериментот
Table 3.3.: Plan matrix of the experiment

Бр. на експ.	Матрица на планот на експериментот				Карактеристики (услови на експериментот)	
	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_1 тип на ткаенина	x_2 притисок на пресување (kg/cm ²)
1	+1	-1	+1	-1	панама	18
2	+1	+1	+1	+1	кепер	18
3	+1	-1	-1	+1	панама	14
4	+1	+1	-1	-1	кепер	14

Основно ниво	Платно преплет	$x_2 = 16$
Интервал на варијација	Платно - панама, платно -	

	кепер	
Горно ниво	кепер	18
Долно ниво	панама	14

3.5. Определување на јачина и модул на еластичност при свиткување (Flexural strength and modulus of elasticity in flexure)

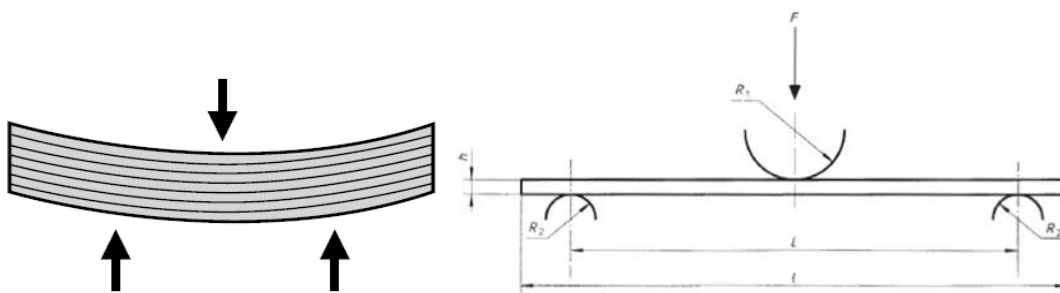
За испитување на јачина на свиткување на композитните плочи беше користен стандардот EN ISO 14125: 1998. Испитувањето на свиткување се користи за определување на цврстината и промената на формата при оптоварувања на свиткување на композитниот материјал. Димензиите на испитуваните епрувети, како и нивната изработка, зависи од видот на материјалот кој се испитува. При испитување на композитен материјал, стандардните пропишани димензии на испитуваните епрувети според EN ISO 14125 ($b \times l$ дебелината на епруветата, каде b е ширина на епруветата, l е должина на истата), се 15×60 дебелината на епруветата (mm). Од секоја композитна плоча се сечат по 5 епрувети (60×15 mm) во надолжна насока (MD) и по 5 епрувети (60×15 mm) во напречна насока (CD) со помош на дијамантска пила. Изгледот на епруветите за испитување на јачината на свиткување е илустриран на Слика 3.5.

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



Слика 3.5.: Стандардни епрувети за испитување на јачина на свиткување
 Figure 3.5.: Standard test tubes for examination of flexural strength

Овој метод екстензивно се користи за механичка карактеризација поради едноставноста на подготовка и тестирање на примерокот. Ова е интересен начин за истовремено изложување на тест примерокот на сили на истегнување, компресија и смолкнување, со цел да се провери неговиот структурен интегритет. Кога примерокот е оптоварен како на Слика 3.6. горната површина на ламинатот е изложена на компресија, долната површина е изложена на истегнување, додека во средишниот (централниот) дел на ламинатот настанува смолкнување.



Слика 3.6.: Тест примерок изложен на свиткување
 Figure 3.6.: Test sample exposed to bending

За испитување на јачината на свиткување на композитните плочи се користеше универзална машина за тестирање, „SCHENCK-Hidrauls PSB“ со максимална сила од 250 kN и брзина на тестирање од 5 mm/min (Сл. 3.5).



Слика 3.7.: Испитување на јачината на свиткување со Метода со три точки на свиткување

Figure 3.7.: Flexural strength test using a three-point flexural method

При испитување на епруветите со правоаголен попречен пресек, напрегањето при свиткување е пресметано во согласност со равенката 3.1:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad [3.1]$$

каде што:

σ_f – напрегање на свиткување изразено во МПа;

F – сила на оптоварување во N;

L – растојание, должина каде примерокот се потпира (т.е. меѓу потпорите) во mm, така што според овој стандард растојанието е 40 mm;

h – дебелина на испитуваната епрувета во mm и

b – ширина на испитуваната епрувета во mm.

Модулот на еластичност при испитување на свиткување ја опишува зависноста помеѓу напрегањето, σ и деформацијата, ε . Модулот на еластичност при свиткување (E_f) и деформацијата при свиткување (ε_f) на композитните примероци се пресметани со примена на следниве равенки (3.2 и 3.3):

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \left(\frac{\Delta F}{\Delta s} \right) \quad [3.2]$$

$$\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2} \quad [3.3]$$

каде што:

E_f – модул на еластичниот при свиткување во МПа;

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

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

ε_f – деформација при свиткување во % и

s – максимално отклонување од центарот на плочата при испитување во mm [21].

4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА (RESULTS AND DISCUSSION)

Во рамките на овој магистерски труд беа произведени композитни плочи со користење на термореактивен смолен систем: епоксидна смола (DER 383) и зацврстувач (Polurox H 766) како матрица, зајакнати со различен тип на стаклени ткаенини, односно овде беа користени ткаенини со панама преплет како и ткаенини со кепер преплет.

За добивање на композитните плочи најпрвин се користеше технологијата рачно импрегнирање со која се доби ламинат, кој потоа се употреби во технологијата обликување под притисок, позната уште како компресионо пресување. Притисок кој го употребивме за пресување беше во интервал помеѓу 14 и 18 kg/cm², на претходно одредена температура. Беа направени два типа на композитни плочи, композити зајакнати со кепер стаклена ткаенина, и композити зајакнати со панама стаклена ткаенина. Со примена на дизајн и анализа на експериментите и според план - матрицата на експериментот, поради тоа што овде се работи за двофакторен експеримент беа направени четири различни типови на композитни плочи.

4.1. ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА РЕГРЕСИОНА РАВЕНКА, ОДНОСНО РАВЕНКА ЗА МОДЕЛ ОД ПРВ РЕД СО ДВА ФАКТОРИ (DETERMINATION OF REGRESSION EQUATION)

Од експерименталните тестови на четирите примероци пресметана е јачината на свиткување на композитните плочи со примена на универзална машина за тестирање, при што во нашиот случај беше користен Методот со три точки на свиткување. За 2² сефакторен експеримент потребно беше да се направат 4 тестови (2² = 4), секој со различна комбинација на факторите и нивоата. Со оглед на тоа дека за секоја комбинација се направени 3 теста (3 реплики), вкупно се извршени 12 тестови. Резултатите од секој тест (со соодветното ниво на факторите) се претставени во Табелата 4.1.

Табела 4.1.: Резултати за јачината на свиткување на композитните плочи

Table 4.1.: Results for the flexural strength of composite plates

Ознака на примероците / Sample Number		Ширина / Width, b (mm)	Дебелина / Thickness, h (mm)	Должина / Length, L (mm)	Напрегање на свиткување / Flexural strain, σ_f (MPa)	σ_{sr} (MPa)
1	1-1	15,40	2,72	60,31	468,068	470,82
	1-2	15,31	2,76	60,29	478,467	
	1-3	15,33	2,75	60,59	465,925	
2	2-1	15,44	2,10	60,01	547,910	548,99
	2-2	15,22	2,05	60,12	550,358	
	2-3	15,42	2,07	60,27	548,701	
3	3-1	15,41	2,92	60,29	436,539	438,35
	3-2	15,30	2,91	60,29	432,456	
	3-3	15,34	2,94	60,40	446,050	
4	4-1	15,35	2,68	60,40	514,020	512,90
	4-2	15,42	2,60	60,13	519,950	
	4-3	15,38	2,68	60,23	504,734	

Во Табела 4.1. се презентирани резултатите од тестовите. Како што може да се види, секој тест е вршен три пати y_{j1} , y_{j2} и y_{j3} а во последната колона е презентирана нивната средна вредност која ја земаме како валиден одзив кај сите серии на проби. Неа ја пресметуваме според следнава релација:

$$\bar{y}_j = \frac{y_{j1} + y_{j2} + y_{j3}}{3}$$

За првата проба добиваме:

$$\bar{y}_1 = \frac{468,068 + 478,467 + 465,925}{3} = 470,82$$

На истиот начин се пресметува средната вредност и за останатите проби.

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

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

каде што:

S_j^2 - варијансата која го карактеризира растурањето (расејувањето) на резултатите од опитите на j -та серија на опити;

$i = 1, 2, 3... k$ - е бројот на паралелни опити (реплики).

На пример, S_1^2 за првата серија, одзивите се 468,068, 478,467 и 465,925, а нивната средна вредност е 470,82, па варијансата, односно дисперзијата ќе биде:

$$S_1^2 = \frac{1}{3-1} \sum_{i=1}^3 (468,068 - 470,82)^2 + (478,467 - 470,82)^2 + (465,925 - 470,82)^2 = 45,005569$$

На истиот начин се пресметуваат сите вредности на дисперзијата за сите опити кои се направени и истите се дадени во Табела 4.2

Табела 4.2.: Резултати од пресметките на дисперзијата

Table 4.2. Results of the dispersion calculations

проба	y_{j1}	y_{j2}	y_{j3}	\bar{y}	S_j^2
1	468,068	478,467	465,925	470,82	45.005569
2	547,910	550,358	548,701	548,99	1,5606725
3	436,539	432,456	446,050	438,35	48,6544785
4	514,020	519,950	504,734	512,90	58,82
Σ					154.04072

При тоа, **варијансата на репродуктивноста** или **грешката на опитите** се пресметува по равенката за варијансата (стандардната девијација е квадратен корен од варијансата) :

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

Во нашиов пример варијансата е:

$$S_j^2 = \frac{45 + 1,56 + 48.65 + 58.82}{4} = \frac{154.04072}{4} = 38,51$$

За проверка на репродуктивноста на опитите (изводливоста или апликативноста на експериментот) се наоѓа односот на најголемата варијанса и сумата на сите варијанси:

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

N – е бројот на серии, т.е. различни експерименти (во нашиов пример, 4).

Оваа величина се нарекува пресметано значење на критериумот на **Кохрен**.

Да провериме дали нашиот експеримент е репродуктивен. Од добиените резултати можеме да видиме дека најголемата девијација изнесува 58.82, со замена во равенката за **Gp** добиваме:

$$Gp = \frac{58,82}{45 + 1,56 + 48,65 + 58,82} = \frac{58,82}{154,04072} = 0,3818470856$$

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 %.

Табеларната вредност, т.е. максимално дозволената вредност за Кохреновиот критериум ја наоѓаме од табела, за $N = 4$ и $k = 3$, Кохреновиот критериум е $GT = 0,7679$. Бидејќи е исполнет условот $GP \leq GT$, нашиот експеримент е репродуктивен и можеме да го продолжиме.

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

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:

$$|\beta| \geq S_{\beta} t \quad S_{\beta} = \sqrt{\frac{S_j^2}{N}}$$

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:

$$f = N(k-1) = 4(3-1) = 8$$

Во случај да не е задоволен критериумот, тогаш коефициентот на регресија се изоставува како незначаен, т.е. невлијателен коефициент во регресионата равенка.

За нашиот експеримент:

$$S_j^2 = 38,51 \quad S_\beta = 3,1028212968 \quad |\beta| \geq 7,1675171956$$

што значи, секој коефициент по апсолутна вредност треба да биде поголем или еднаков на 7,1675171956, но претходно треба да ги пресметаме вредностите на секој коефициент од равенката за модел од прв ред со два фактори.

Коефициентот β_0 претставува средна вредност од сите одзиви (\bar{y}).

Останатите коефициенти од равенката се пресметуваат преку следните равенките:

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

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

За да се определат кодираниите 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 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 3.3).

Во Табела 4.4 се дадени пресметаните вредности на коефициентите β_i од каде што може да се забележи дека коефициентите: $\beta_1, \beta_2, \beta_{12}$ по апсолутна вредност кои се помали од 7,1675171956 се незначајни за експериментирањето и може да се изостават во регресионата равенка, т.е. во равенката за Модел од прв ред со два фактори.

Табела 4.3.: Резултати од пресметките на вредностите на коефициентите, β_i

Table 4.3.: Results of the calculation of the coefficient values, β_i

N	X ₀	X ₁	X ₂	X ₁ X ₂	\bar{y}
1	1	-1	1	-1	470,82
2	1	1	1	1	548,99
3	1	-1	-1	1	438,35
4	1	1	-1	-1	512,90

β_0	β_1	β_2	β_{12}
492,765	38,18	17,14	0,905

Како што можеме да видиме, коефициентот β_{12} не го задоволува критериумот и се отфрла како незначаен.

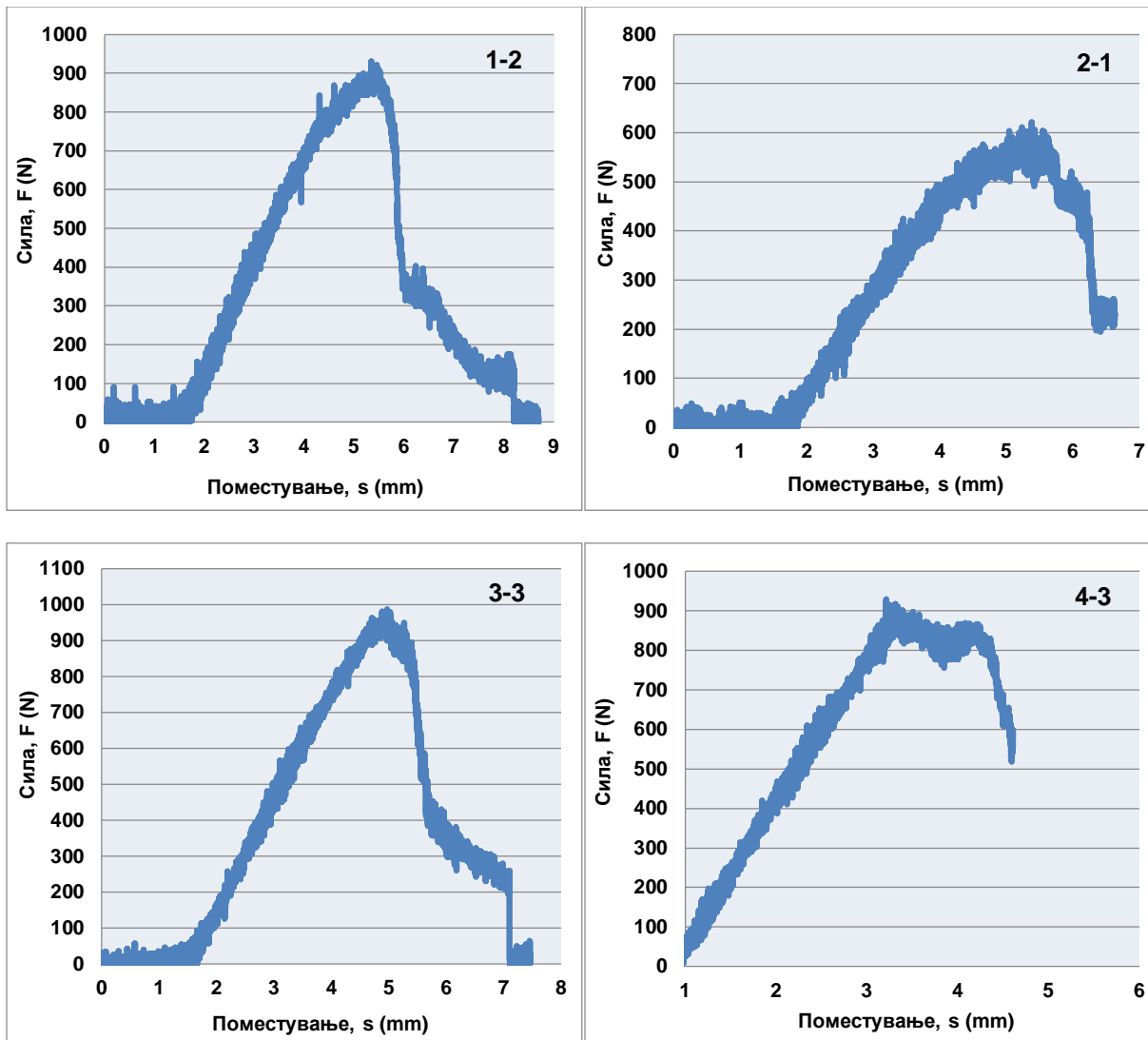
Според тоа, регресивната равенка со кодирани променливи ќе биде:

$$Y=492,765+38,18x_1+17,14x_2$$

Од регресионата равенка може да се забележи дека притисокот на пресување како процесен параметар X_2 влијае на јачината на свиткување на композитните плочи, меѓутоа, со овој експеримент се покажа дека типот на преплетот кај зајакнувачкиот материјал има поголемо влијание на јачината на свиткување кај композитните плочи. Така, ако направиме споредба на композитни плочи зајакнати со стаклени ткаенини во панама и кепер преплет пресувани при ист притисок, ќе забележиме голема разлика во јачината на свиткување, при што композитите зајакнати со кепер ткаенина дадоа подобри резултати.

Од резултатите прикажани во Табела 4.1 може да се забележи дека примероците од 2 со ознака 2 и 3 покажаа најдобри резултати за јачина на свиткување. Овие примероци беа пресувани со повисок притисок, односно со 18 kg/cm^2 . Па, така, највисоки јачини на свиткување покажаа примероците со ознака 2 кои беа зајакнати со кепер ткаенина и пресувани со максимален притисок од 18 kg/cm^2 согласно план матрицата на експериментите. Додека примероците со ознака 3 зајакнати со панама ткаенина и со притисок на пресување од 14 kg/cm^2 покажаа најниска вредност на јачина на свиткување. Од добиените резултати може да се забележи дека својствата на композитните примероци примарно зависат од типот на зајакнувачкиот материјал кај композитот, како и од применетиот притисок. Имено, примената на подобар тип на зајакнувачка ткаенина (во случајов кепер) и поголем притисок на пресување ќе резултира со најголема јачини на свиткување кај композитните плочи. Добиената регресиона равенка укажува на истиот заклучок.

На Сликата 4.1. можат да се видат кривите сила – поместување добиени од универзалната машина за тестирање.



Слика 4.1.: Добиени резултати од универзалната машина за тестирање на примерок со ознака 1-2, 2-1, 3-3 и 4-3

Figure 4.1.: The results of the universal test machine for the sample 1-1, 1-2 and 1-3

Може да се забележи дека добиените криви имаат ист облик, односно кај сите постои линеарен дел кој расте сè до деструктирање на некој од слоевите во композитната плоча. Меѓутоа, во композитот постојат слоеви кои сè уште се спротивставуваат на применетата сила, така што силата расте до одреден максимум, а после деструкција на примерокот се прекинува дејството на истата.

На универзалната машина беше регистрирана силата при која настанува некаква деструкција во композитната плоча и максималната сила до која материјалот покажа отпорност.

Од добиените резултати од универзалната машина за тестирање на примероците може да се забележи дека сепак поголемо влијание на јачината на свиткување има процесниот параметар означен како X_1 , односно тоа е типот на преплет на зајакнувачот во композитот. Со ова истражување се потврди дека, механичките карактеристики на композитот (во нашиот случај јачина на свиткување) првенствено се детерминирани од зајакнувачот. Овде, бидејќи за зајакнувач се користеше ткаен материјал, видовме дека од исклучителна важност е каков тип ткаенина ќе се одбере при дизајнирање на композитот, бидејќи различното поврзување на основните и јаточните жици овозможува менување на перформансите на новодобиениот материјал. Тоа кај полимерните композитни материјали зајакнати со текстил е важно, затоа што инженерот има широка можност за креација и создавање на композити кои ќе одговараат на зададените барања.

5. ЗАКЛУЧОК (CONCLUSION)

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

- Беше направена анализа на текстилни влакна кои можат да се користат како зајакнувачка фаза во добивање на композитна структура. Врз основа на направената анализа беа избрани стаклените влакна во форма на панама и кепер преплет како најекономични и најдостапни за правење експерименти;

- Беше даден преглед и основни особености на полимерните матрици кои можат да се користат за добивање на композитни материјали. Како полимерна матрица за експериментите беше избрана епоксидна смола;

- Беше избрана технологијата на рачно импрегнирање (**Hand lay-up technology**) на нанесување на полимерна матрица за добивање на полупроизвод – стаклен препрег;

- Беше избрана технологијата на компресионо пресување на слоевите од стаклен препрег за добивање на композитни плочи;

- Беше направено дизајнирање, т.е. планирање на експериментите за технолошкиот процес на компресионо пресување (**Compression molding**) и врз основа на план матрицата беа направени / произведени 4 модели композитни плочи;

- При дизајнирањето на процесот беа земени два параметри кои најмногу влијаат на експериментите: тип на преплет и притисок на пресување, притоа беше користен двофакторен метод за планирање на експерименти со две нивоа на варијација 2^2 ;

- За сите произведени композитни плочи беше тестирана јачината на свиткување;

- Врз основа на добиените експериментални податоци, земајќи предвид дека експериментите беа реплицирани, беше определена дисперзијата за сите 4

експерименти и врз основа на Кохреновиот критериум беше определено дека експериментите се репродуктивни;

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

- Беше добиена регресиона равенка која најдобро го опишува процесот, при што беше добиено дека најголемо влијание има типот на преплет на зајакнувачот врз јачината на свиткување, а другиот фактор, поточно притисокот на пресување има влијание на одзивот на функцијата, но со помал интензитет;

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

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

6. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES):

- 1) A. C. Long (2005), Design and manufacture of textile composites. Woodhead Publishing Limited;
- 2) L. L. Sobrinhoa, V. M. Caladob and F. L. Bastian. Development and Characterization of Composite Materials for Production of Composite Risers by Filament Winding. *Materials Research*, 14(3): 287-298, 2011;
- 3) Daniel Gay, Suong V. Hoa (2007), Composite Materials: Design and Applications, Second Edition, CRC Press, Taylor & Francis;
- 4) M. M. Schwartz (1984), "Composite materials handbook" McGraw-Hill;
- 5) G.I. Williams, R. P. Wool, *Appl. Comp. Mater.*, **7**, 421 (2000);
- 6) A.K. Mohanty, M. Misra and L.T. Drzal, *Composite Interfaces*, **8**, 313 (2001);
- 7) Suong V. Hoa (2009), "Principles of the manufacturing of composite materials" by DEStech Publications, Inc., Chapter 5 page 205-231, 343;.
- 8) Stanley T. Peters, Yu. M. Tarnopol'skii, A. I. Beil (1998), "Handbook of Composites" Chapter - Filament Winding, Pages 456-475 Springer US.;
- 9) N. Akkus, G. Genc and C. Girgin. Control of the presentation in Filament winding process. *Acta mechanica et automatica*, vol. 2 (3), 2008;
- 10) D. Cohen. Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength. Elsevier Science Limited, Composites Part A 28A 1035-1037 G', 1997;
- 11) Stanley T. Peters, "Composite Filament Winding", ASM International, 2011, ASM International, 167 pages;
- 12) Koussios, S. (2004), Filament Winding: a Unified Approach, Published and distributed by: DUP Science. 400;
- 13) Emrah Salim Erdiller (2004), Experimental investigation for mechanical properties of Filament wound composite tubes, Master thesis, 129p.;
- 14) 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;

- 15) Davies, I. J., & Hamada, H. (2001), Flexural properties of a hybrid polymer matrix composite containing carbon and silicon carbide fibres. *Advanced Composite Materials*. 10 (1), 77-96;
- 16) Sudarisman, & Davies, I. J. (2008), Flexural failure of unidirectional hybrid fibre–reinforced polymer (FRP) composites containing different grades of glass fibre. *Advanced Materials Research*. 41-42, 357-362;
- 17) Lee, S. W., Lee, S. G., Bae, D., & Kim, B. S. (2005), Flexural characteristics of filament wound GFRP composite bridge deck. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers Magazine*. 25 (5A), 751-760;
- 18) Kirsi Turto, Tommi berg, Jyrki Vuorinen. (2009). Influence of the fibre tension on the properties of the filament wound tubes, SAMPE EUROPE 30 International Jubilee Conference and forum. SEICO 09, 635-641;
- 19) <https://nptel.ac.in/courses/112107085/module5/lecture6/lecture6.pdf>;
- 20) <https://nptel.ac.in/courses/112107085/module5/lecture4/lecture4.pdf>;
- 21) Annual Book of ASTM Standards EN ISO 14125, 'Plastics, fibre-reinforced plastic composites, flexural properties, testing';
- 22) В. Сребренкоска, Е. Фиданчевска (2011), *Инженерство на материјали*;
- 23) Daniel Gay, Soung V. Hoa (2007), *Composite materials: Design and Applications*, Second Edition, CRC Press, Taylor and Francis, 568;
- 24) H. H. Yang (1993), *Kevlar Aramid Fiber*, John Wiley & Sons SEA, 200;
- 25) J. Goupy, L. Creighton, *Introduction to Design of Experiments*, SAS Publishing, 2007;
- 26) Д. Димески, В. Сребренкоска, е-библиотека Дизајн и анализа на експерименти, Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип, 2014;
- 27) A. Dean, D. Voss, *Design and Analysis of Experiments*, Springer-Verlag New York, Inc. 1999;
- 28) D. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 5th Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2001;
- 29) Н. Спилин, В. Лавров, *Методи планированија и обработки резултатов инженерного експеримента*, ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, Екатеринбург, 2004;

- 30) В. Риков, В. Иткин, Математическаја статистика и планирование експеримената, РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, Москва, 2008;
- 31) И. Агајинц, А. Орлов, Планирование експеримента и анализ данних, МИТХТ, Ломоносов, Москва, 1998;
- 32) С. А. Семонов, Планирование експеримента в химии и хемическој технологији, Москва, 2005 (www.mitht.ru/e-library);
- 33) Ф. С. Новик and Я. Б. Арсов, Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования експериментов. Москва, Машиностроение, 1980;
- 34) Dean and D. Voss. Design and Analysis of Experiments. Springer-Verlag New York, 1999.

ЛИСТА НА ТАБЕЛИ:

Табела 2.1.: Споредба на механичките својства на комерцијално достапни зајакнувачи влакна;

Табела 2.2.: Типови на стаклени влакна;

Табела 2.3.: Состав на некои типови стаклени влакна (% теж.);

Табела 2.4.: Физички и механички и особини на стаклени влакна;

Табела 2.5.: Различни видови на епоксидни композити и процес на производство;

Табела 2.6.: Суровини кои се употребуваат во технологијата на рачно импрегнирање;

Табела 2.7.: Суровини кои се користат во процесот на компресионо пресување;

Табела 3.1.: Технички карактеристики на Е- стаклените ткаенини кепер и панама;

Табела 3.2.: Карактеристики на компонентите на смолниот систем;

Табела 3.3.: План матрица на експериментот;

Табела 4.1.: Резултати за јачината на свиткување на композитните плочи;

Табела 4.2.: Резултати од пресметките на дисперзијата;

Табела 4.3.: Резултати од пресметките на вредностите на коефициентите,

β_i.

ЛИСТА НА СЛИКИ:

Слика 2.1.: Различни форми на зајакнувачки текстилен материјал;

Слика 2.2.: Класификација според геометрија на зајакнувачот;

Слика 2.3.: а) Терморелеактивна матрица зајакната со сецкани влакна,
в) невмрежена смола и полнител;

Слика 2.4.: Влијание на карактеристичниот однос l/d на честичките на полнителот врз распределбата на напрегањата во матрицата: а- $l/d=1$, сферна честичка; б-кратко крто влакно, $l/d=10-1000$; с-бесконечно крто влакно, $l/d=\infty$;

Слика 2.5.: Хемиски структури на некои од најчесто применуваните вмрежувачки агенси;

Слика 2.6.: Хемиски структури на функционални и мултифункционални епоксиди;

Слика 2.7.: Технологија на рачно импрегнирање;

Слика 2.8. Технологија на компресионо пресување;

Слика 2.9.: Критични процесни параметри на Методот компресионо пресување;

Слика 2.10.: Двофакторен експеримент;

Слика 2.11.: Двофакторен експеримент без интеракција;

Слика 2.12.: Двофакторен експеримент со интеракција;

Слика 3.1.: Кеपर преплет (а), панама преплет (б);

Слика 3.2.: Двокомпонентна смеса;

Слика 3.3.: Нанесување на смола на примероците стаклена ткаенина и добивање на препрег;

Слика 3.4.: Прес машина;

Слика 3.5.: Стандардни епрувети за испитување на јачина на свиткување;

Слика 3.6.: Тест примерок изложен на свиткување;

Слика 3.7.: Испитување на јачината на свиткување со Методот со три точки на свиткување;

Слика 4.1.: Добиени резултати од универзалната машина за тестирање на примерок со ознака 1-2, 2-1, 3-3 и 4-3.