



Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје

Машински факултет



м-р Сара Сребренкоска, дипл. инж.

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

**РОБОТИЗИРАНИ ПРОЦЕСИ ЗА АВТОМАТСКО ПОЛАГАЊЕ НА
КОМПОЗИТНИ ВЛАКНА/ЛЕНТИ (AFR/ATL) ПРИ ПРОИЗВОДСТВО НА
ДЕЛОВИ ОД КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ**

Ментор

Проф. Д-р Владимир Дуковски

Скопје, 2021 год.



Ss. Cyril and Methodius University in Skopje
Faculty of Mechanical Engineering



M. Sc. Sara Srebrenkoska

DOCTORAL DISSERTATION

ROBOTIZED AUTOMATED FIBER PLACEMENT AND AUTOMATED
TAPE LAYING (AFP/ATL) PROCESSES FOR COMPOSITE MATERIAL
PART PRODUCTION

Mentor

Prof. Dr. Vladimir Dukovski

Skopje, 2021

Ментор:

Д-р Владимир Дуковски, ред. проф.

Машински факултет – Скопје

Членови на комисија:

Д-р Атанас Кочов, ред. проф.

Машински факултет – Скопје

Д-р Валентина Гечевска, ред. проф.

Машински факултет – Скопје

Д-р Владимир Дуковски, ред. проф.

Машински факултет – Скопје

Д-р Кирил Лисичков, ред. проф.

Технолошко - металуршки факултет – Скопје

Д-р Мишко Цидров, вон. проф.

Машински факултет – Штип

Студиска програма: Машинство

Студиска подпрограма: Производно инженерство

Научно-истражувачко подрачје: Техничко - технолошки науки (2)

Научно-истражувачко поле: Машинство (214)

Научно-истражувачка област: Производно машинство, технологии и системи (21403)

Датум на одбрана: 16.04.2021 год.

Докторска дисертација на Машински факултет

Искрена благодарност

- На мојот ментор **Проф. Д-р Владимир Дуковски**, за искрената помош и поддршка при насочувањето во полето на научно-истражувачката работа и целосната ангажираност и соработка при реализацијата на оваа дисертација.
- На **Проф. Д-р Атанас Кочов**, за искрената соработка, покажаниот интерес и стручни совети во текот на целокупното студирање на докторските студии на студиската програма *Производно инженерство*.
- На **Проф. д-р Кирил Лисичков**, за потполната ангажираност, корисните стручни совети и за севкупната поддршка што ми ја укажуваше од дипломирањето па се до реализацијата на оваа дисертација.
- На **Проф. Д-р Валентина Гчевска**, за покажаниот интерес, корисните совети и соработка за изработка на трудот.
- На **Проф. д-р Мишко Цидров**, за покажаниот интерес, поддршката и соработката при оформувањето на дисертацијата.
- На стручниот тим од **Институтот за современи композити и роботика од Прилеп**, кои ми ја овозможија реализацијата на експерименталниот дел од овој труд како и за укажаната можност за постојана соработка.
- На **моите родители**, за љубовта, вербата и поддршката која постојано ми ја укажуваа и спремноста секогаш да ме пратат и помагаат по патот на успехот.
- На сите оние кои на било каков начин ми помогнаа.

*„ Она што човековиот ум може да го замисли и да верува во тоа, тоа може и да
го оствари“*

Наполеон Хил

АПСТРАКТ

Автоматското полагање на композитни влакна/ленти (AFP/ATL) и загревање со помош на ласер (LAFP/LATL) претставува современа технологија за развој на лесни делови со врвни карактеристики, првенствено во авионската, автомобилската, вселенската, воената и многу други доминантни индустрии во светот. Производите најчесто се произведуваат од препрег, кој се состои од јаглородни влакна импрегнирани со полимерна матрица. Процесот се состои во автоматско полагање на влакна/ленти и оформување на слој, кој се спојува со претходниот се до формирање на крајната ламинатна структура. За автоматското полагање на лентите или влакната се користи роботизирана инсталација за прецизно полагање на лентите по претходно дефинирани патеки.

Истражувањата во рамките на оваа докторска дисертација се насочени кон добивање на делови со врвни карактеристики од термопластичен композитен препрег, на самото место (*in situ*), односно без дополнително процесирање. За истражувањето, анализирани се технолошките параметри на процесот, поврзувањето на слоевите во ламинатната структура, а истражувани се и својствата на препрег материјалите и добиената композитна структура. Тоа е направено со комбинација на експериментална работа и планирање на експериментите и со оптичка и електронска микроскопија за истражување на структурата на материјалите и нивната поврзаност со процесните параметри. За истражувањата, користени се три типови на унидирекционални препреги материјали врз основа на јаглородни влакна и термопластични полимерни матрици PPS и PEEK. Со примена на ATL постапката произведени се ламинатни плочи од трите типови препрег ленти, а за определување на влијанието на некои технолошки параметри применето е планирање на експериментите. Применет е полн три факторен експериментален дизајн, а согласно тоа произведени се осум комбинации ламинатни плочи од трите типови препрег ленти, со варијација на три највлијателни параметри: температурата на процесирање, аголот на поставување на ласерот и компакциониот притисок на валјачето. За сите произведени ламинатни плочи определено е напрегање при свиткување, а врз основа на добиените резултати за сите осум комбинации на факторите, добиени се регресиони равенки кои најсоодветно ги опишуваат процесите. За сите три типови ламинатни плочи, добиено е дека температурата на процесирање и притисокот на валјачето значајно влијаат врз напрегањето при свиткување на ламинатните плочи. Најмало е влијанието на аголот на поставување на ласерот. Постои и интеракција меѓу

сите фактори која исто така влијае врз процесот, но со помала значајност. Направена е проверка на равенките за нивната адекватности за опишување на истражуваниот процес и врз основа на направените пресметки заклучено е дека регресионите равенки се адекватни и сосема добро ги опишуваат процесите.

Промената на условите на процесирање прави промена во механичките карактеристики на ламинатните плочи, а тоа како резултат на добро постигнат интимен контакт при поврзување на слоевите во ламинатот. Највисоки вредности за напрегање при свиткување покажаа примероците добиени на најголемите истражувани температури на процесирање и притисок на валјаче. Исто така, добро напрегање при свиткување покажаа и примероците кои се добиени на најголемиот притисок на валјаче, а најмала температура на процесирање и агол на поставеност на ласер од 25°. Примероците добиени на најмал притисок на валјаче и температура на процесирање и најголем аголот на поставеност на ласерот, покажаа најмала вредност на напрегање при свиткување. Микроскопските анализи на примероците со највисоки вредности за напрегање при свиткување покажаа добра интерламинарна поврзаност меѓу слоевите и мал процент на пори во споредба со примероците со пониски вредности за напрегање при свиткување каде содржината на пори е поголема. Во рамките на оваа докторска дисертација произведени се ламинатни плочи и со AFP постапката при најдобрите услови на полагање добиени од ATL постапка. Од нивното тестирање за напрегање при свиткување добиено е дека истите имаат пониски вредности за околу 25% во споредба со тие добиени при исти услови со ATL постапката. Микроскопските анализи покажаа присуство на поголема содржина на пори и послаба врска меѓу слоевите. Заклучено е дека полагањето со AFP постапка на потенки ленти (влакна) може успешно да се применува за добивање на мали и несиметрични делови, каде ATL постапката е несоодветна заради сложената геометрија на деловите. На крај, со цел да се покаже предноста од автоматизација на процесите во однос на точност, продуктивност и добивање на производи со врвни карактеристики, произведени се ламинатни плочи со рачно полагање и компресионо пресување, кои се со послаб квалитет и со дефекти во нивната микроструктура.

Клучни зборови: термопластичен препрег, автоматско полагање на влакна/ленти, планирање на експерименти, интерламинарно поврзување, компресионо пресување, оптичка и електронска микроскопија.

ABSTRACT

Automated fiber placement and automated tape laying (AFP/ATL) with laser assisted heating (LAFP/LATL) is an attractive manufacturing technology for the development of lightweight and high performance components, primarily for the aerospace, automotive, military and many other dominant industries worldwide. The products are commonly manufactured from a material called prepreg, which consists of carbon fibers impregnated with polymer resins. The process comprises the automated laying of fiber reinforced thermoplastic tapes to formation of a layer which merges with the previous one until the build up a final laminate structure. For the automated laying of the prepreg tape or fibers, a robotic installation is used for precise laying of the tape along predefined paths.

The investigation in the frame of this doctoral thesis focuses on the *in situ* obtaining high performance composite parts based on thermoplastic prereg, without additional processing. For this purpose, the technological parameters of the process, the interlaminar bonding of the layers in the laminate structure as well as the properties of the prepreg materials and the obtained composite structure have been analyzed. This was done through a combination of experimental work and design of the experiments and with optical and scanning electronic microscopy (SEM) to study the microstructure of prepreg materials and laminates and their relationship to process parameters. For the investigation, three types of unidirectional prepreg materials based on carbon fibers and thermoplastic polymer matrices PPS and PEEK have been used. The laminate plates from the three types prepreg have been produced by ATL process and for the determining of the influence of some technological parameters, the design of experiments have been applied. The full factorial experimental design has been applied and base on that eight combinations of laminated plates were produced separately from the three types prepreg, with variation of the three most influenced factors: processing temperature, laser placement angle and compaction pressure of the roller. For all produced specimens, the flexural strength have been tested and on the basis of the received experimental data it was created the regression equations which the best describes the processes. For all three types of laminate plates, it has been found that the processing temperature and the compaction pressure of the roller significantly influence on the flexural strength of the laminate plates. The influence of the laser placement angle affects insignificantly. There is an interaction between all factors that also affects the process but with smaller negligible effect on the flexural strength. Based on the calculation made for the adequacy of the researched process, it has been concluded that the regression equations are adequate and describe the process quite well.

The change of the processing conditions makes a change in the mechanical characteristics of the laminate plates, as a result of a well achieved interlaminar bonding between the layers in the laminate. Namely, the samples obtained at the highest investigated processing temperatures and compact roller pressure have the highest values for flexural strength. Also, the samples obtained at the highest compaction roller pressure and the lowest processing temperature and the laser placement angle of 25° have good flexural strength. The samples obtained at the lowest compaction roller pressure and processing temperature have shown the lowest value of flexural strength. Microscopic analysis of the samples with the highest values of flexural strength have shown a good interlaminar bonding between the layers and a small percentage of pores compared to the samples with the lowest values of flexural strength where the pore content is higher.

In the frame of this doctoral dissertation, laminate plates have been produced with the AFP process on the best processing conditions obtained from the ATL process. From the flexural strength testing it has been found that they have lower values of about 25% compared to those obtained under the same conditions with the ATL process. Microscopic analyses have shown the presence of higher pore content and weaker interlaminar bonding between the layers. It has been concluded that the AFP procedure can be successfully applied to obtain small and asymmetrical parts, where the ATL process is inappropriate due to the complex geometry of the parts. Finally, in order to show the advantage of automated processes in terms of accuracy, productivity and obtaining high performance products, laminated plates with manual laying and compression molding have been produced, which are with lower quality and with defects in their structure.

Key words: thermoplastic prepreg, automated fiber placement, automated tape laying, design of experiments, interlaminated bonding, compression molding, optical and scanning microscopy.

СОДРЖИНА

		Стр.
<i>Глава 1</i>		
1.	Вовед	19
	<i>Мотивација за истражувањето</i>	22
	<i>Предмет и цели на истражувањето</i>	23
1.1	Структура на докторската дисертација	24
<i>Глава 2</i>		
2.	Теоретски основи на композитни материјали	27
2.1.	Композитни материјали	27
2.2.	Структурни елементи кај композитните материјали	28
2.2.1.	Зајакнувачки материјал	29
2.2.1.1.	Ефект на зајакнување со влакна	30
2.2.2.	Матрици кај композитите	32
2.2.2.1.	Високо перформансни термопластични полимерни матрици	36
2.2.2.2.	Предности и недостатоци на термопластичните полимерни матрици	38
2.3.	Технологии за производство на делови од термопластични композитни материјали	41
2.3.1.	Рачно полагање	42
2.3.2.	Полагање на препрег	43
2.3.3.	Компресионо пресување	45
<i>Глава 3</i>		
3.	Планирање на експерименти	46
3.1.	Стратегија на експериментирањето	46
3.2.	Основни принципи на експериментирањето	48
3.3.	Постапки за планирање на експерименти	49
3.4.	Факторен дизајн на експерименти	51
<i>Глава 4</i>		
4.	Автоматизација на процесите при производство на делови од композитни материјали	54

4.1.	Автоматизирано полагање на влакна/ленти	54
4.2.	Роботизирани процеси за автоматизирано полагање на термопластични влакна/ленти (AFP/ATL) со примена на ласер	60
4.2.1	Процесирање на термопластичен препрег материјал со ATL/AFP	64
4.2.1.1.	Интимен контакт меѓу слоевите препрег	66
4.2.1.2.	Автохезија - директно поврзување или самоповрзување	69
4.2.1.3.	Поврзување	70
4.2.1.4.	Кристалност	71
4.3.	Актуелни истражувања за роботизирани ATL/AFP постапки за добивање на композитни структури	72
<i>Глава 5</i>		
5.	Предложен модел за работа	78
<i>Глава 6</i>		
6.	Експериментален дел	82
6.1.	Материјали користени за експериментите	82
6.2.	Добивање на ламинатни плочи со полагање на препрег ленти UD1 и UD2 со ATL постапка	84
6.2.1.	Примена на планирање на експерименти за добивање на ламинатни плочи со полагање на препрег ленти UD1 и UD2 со ATL постапка	89
6.3.	Добивање на ламинатни плочи со полагање на UD3 препрег ленти со ATL и AFP постапка	94
6.4.	Добивање на композитни плочи со рачно полагање на препрег ленти UD1, UD2 и UD3 и со конвенционално компресионо пресување	97
6.5.	Определување на напрегање при свиткување на примероците добиени од ламинатните плочи	98
6.6.	Микроскопски анализи на примероци од добиените композитни плочи	100
6.6.1.	Анализа со оптичка микроскопија	100
6.6.2.	Анализа со електронска микроскопија	101
<i>Глава 7</i>		

7.	Анализа на резултатите	102
7.1.	Добиени резултати за напрегање при свиткување на примероци ламинатни плочи LATL-UD1, LATL-UD2 и LATL-UD3 добиени со ATL постапка	102
7.2.	Добивање на регресиони равенки за модел од прв ред за примероците добиени со ATL постапка	107
7.2.1.	Добивање на регресиона равенка за примероци LATL-UD1	107
7.2.2.	Добивање на регресиона равенка за примероци LATL-UD2	118
7.2.3.	Дискусија на резултатите добиени за влијанието на технолошките параметри за ламинатните примероци LATL-UD1 и LATL-UD2	126
7.2.4.	Микроскопски анализи за ламинатните примероци LATL-UD1 и LATL-UD2	132
7.2.5.	Добивање на регресиона равенка за примероци со ознака LATL-UD3	146
7.2.6.	Микроскопски анализи за ламинатните примероци LATL-UD3	154
7.2.7.	Одредување на добиените регресиони равенки за примероци со ознака LATL-UD1, LATL-UD2 и LATL-UD3 во инженерски единици	160
7.3.	Добиени резултати за напрегање при свиткување на примероци ламинатни плочи со ознака LAFP-UD3 добиени со AFP постапка	167
7.4.	Добиени резултати за напрегање при свиткување на примероци ламинатни плочи добиени со рачно полагање на препрег ленти UD1, UD2 и UD3 и со конвенционално компресионо пресување	175
<i>Глава 8</i>		
8.	Заклучок	181
<i>Глава 9</i>		
9.	Користена литература	186
10.	Прилози	197

Листа на слики

Слика 2.1. Влијание на карактеристичниот однос l/d на честичките на полнилото 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 2.2. Распределба на напрегањата на растегнување σ и напрегањата на смолкнување τ по должина на кратко влакно вронето во матрица: 1-матрица; 2-влакно (Р-приложено напрегање, σ_f -напрегање при кинење на влакното)

Слика 2.3. Шема на промената на напрегањето на растегнување во кратко влакно при негова различна должина

Слика 2.4. Семикристални и аморфни термопластични полимери

Слика 2.5. Класификација на термопластични полимери во однос на нивната употреба и цена

Слика 2.6. Различни видови на препрег материјали

Слика 2.7. Консолидација со автоклав на термопластичен ламинат

Слика 2.8. Структура на додатен систем на преси со двојен појас (double belt press and heat)

Слика 2.9. Континуирано обликување со компресионо пресување

Слика 3.1. Генерален модел за систем или процес

Слика 3.2. Процедура за дизајнирање на експерименти

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

Слика 3.4. Дво-факторен експеримент без интеракција

Слика 3.5. Дво-факторен експеримент со интеракција

Слика 4.1. а) AFP гантри машина – Микросам; б) AFP роботска (со повеќе работи) – Микросам

Слика 4.2. а) ATL машина – Микросам; б) Автоматско полагање на ленти на рамна површина и на закривена контура – Микросам

Слика 4.3. Шематски приказ на глава за полагање ленти кај ATL систем според Astrom

Слика 4.4. Пример за ATL системите монтирани на а) хоризонтални кранови и б) вертикални колони

Слика 4.5. Шематски приказ на процесот за автоматско полагање на лента AFP/ ATL со помош на ласер (лево: преден поглед, десно: страничен поглед)

Слика 4.6. Шематски приказ на оптички феномен којшто настанува кога зракот го погодува термопластичниот композит

Слика 4.7. Фактори кои влијаат на автоматизирани процес на полагање со примена на ласер за загревање

Слика 4.8. Интерламинарно поврзување на термопластични композити: лентите се доведуваат во контакт, по што *i.* се развива интимен контакт и *ii.* се случува интердифузија на полимерни синцири [53]

Слика 4.9. Модел на идентичен правоаголник на Lee и Springer и 1-Д модел на проток

Слика 4.10. Фракционен модел површинските неправилности на Yang и Pitchumani

Слика 4.11. Реална површинска рапавост на еднонасочна лента ACP-2/AS4

Слика 4.12. Самоповрзување на семикристална термопластична лента при процес на автоматско полагање

Слика 5.1. Шематски приказ на моделот за работа

Слика 6.1. Шематски приказ на ATL глава

Слика 6.2. Полагање на UD1 и UD2 препрег ленти со помош на глава за ATL автоматско полагање со примена на ласер за загревање, произведена од Микросам, Р. Северна Македонија

Слика 6.3. Шематски приказ на пакет од 8 слоеви

Слика 6.4. Празнини и преклопувања кај композитни материјали (сопствени истражувања)

Слика 6.5. Влијателни фактори при полагање на UD препрег ленти

Слика 6.6. Машина за слитување и премотување на препрег, производство на Микросам

Слика 6.7. Роботска рака со AFP глава со 4 калемии во Институтот за современи композити и роботика (произведена од Микросам - Прилеп)

Слика 6.8. Конструкција на една ламина положана со AFP постапка

Слика 6.9. Подготвен пакет слоеви за компресионо пресување и преса

Слика 6.10. Подготвени примероци и тестирање на еден примерок

Слика 6.11. Места на ламинатна плоча од каде се отсечени примероци и подготвени примероци за снимање

Слика 6.12. Скенирачки електронски микроскоп VEGA3 LMU од фирмата Tescan

Слика 7.1. Резултати за напрегање при свиткување за примероци LATL-UD1, LATL-UD2, LATL-UD3

Слика 7.2. Добиени криви сила – време ($N, sek.$) од тестирање на ламинатните плочи LATL UD1 од серија 1 до серија 8

Слика 7.3. Изглед на примерок LATL UD1 серија 6 после тестирање

Слика 7.4. Добиени криви сила – време ($N, sek.$) од тестирање на ламинатните плочи LATL UD2 од серија 1 до серија 8

Слика 7.5. Изглед на примероци LATL UD2 серија 1 и серија 6 после тестирање

Слика 7.6. Напрегање при свиткување кај ламинатните плочи со ознака LATL-UD1 и LATL-UD2

Слика 7.7. Шематски приказ на влијанието на аголот на поставеност на ласер

Слика 7.8. Шематски приказ за распределба на температурата на лентата и ламинатот

Слика 7.9. Оптички снимки на попречен пресек на унидирекционална препрег лента а) UD1; б) UD2

Слика 7.10. СЕМ снимки на унидирекционални препрег ленти а) UD1; б) UD2

Слика 7.11. Металографски снимки на попречен поресек на примероци ламинатни плочи со ознака LATL-UD1 а) серија 1; б) серија 3

Слика 7.12. СЕМ снимки на попречен поресек на примероци ламинатни плочи со ознака LATL-UD1 а) серија 1; б) сегмент x од серија 3

Слика 7.13. Металографски снимки на попречен поресек на примероци ламинатни плочи со ознака LATL-UD2 а) серија 1; б) серија 3

Слика 7.14. СЕМ снимки на попречен поресек на примероци ламинатни плочи со ознака LATL-UD2 а) серија 1; б) сегмент x од серија 3

Слика 7.15. Металографски снимки на попречен поресек на примероци ламинатни плочи со ознака LATL-UD1 серија 6

Слика 7.17. Металографски снимки на попречен поресек на примероци ламинатни плочи со ознака LATL-UD2 серија 6

Слика 7.18. СЕМ снимки на попречен поресек на примероци ламинатни плочи со ознака LATL-UD2 серија 6

Слика 7.19. Процент на пори кај тестираните примероци

Слика 7.20. Добиени криви сила – време ($N, sek.$) од тестирање на ламинатните плочи LATL UD3 од серија 1 до серија 8

Слика 7.21. Оптички снимки на попречен пресек на унидирекционална препрег лента UD3

Слика 7.22. СЕМ снимки на унидирекционална препрег лента UD3

Слика 7.23. Металографски снимки на попречен поресек на примероци ламинатни плочи со ознака LATL-UD3 а) серија 3; б)серија 6

Слика 7.24. СЕМ снимки на примероци со ознака LATL UD3 а) серија 1; б) серија 3; в) серија 6

Слика 7.25. Напрегање при свиткување во однос на температурата на процесирање – теоретски пресметани и експериментално добиени вредности

Слика 7.26. Добиеени криви сила – време ($N, sek.$) од тестирање на ламинатни плочи LAFP UD3

Слика 7.27. Споредба на добиените вредности за напрегање при свиткување за примероци со ознака LAFP-UD3 и LATL-UD3

Слика 7.28. Металографски снимки на попречен поресек на примероци ламинатни плочи со ознака LAFP-UD3 а) примерок 2; б) примерок 4

Слика 7.29. СЕМ снимки на попречен пресек на примероци ламинатни плочи со ознака LAFP-UD3 а) примерок 2; б) примерок 4

Слика 7.30. Добиеени криви сила – време ($N, sek.$) од тестирање на ламинатни плочи а) CM-UD1; б) CM-UD2; в) CM-UD3

Слика 7.31. Металографски снимки на попречен пресек на ламинатни полчи а) CM-UD1, б) CM-UD2, в) CM-UD3

Листа на табели

- Табела 2. 1. Карактеристики на најчесто користени синтетички влакна
- Табела 2.2. Класификација на композитите
- Табела 2.3. Класификација на најважните термопластични полимери во однос на нивната континуирана употреба - температура, нивната кратенка и примери на примена
- Табела 2.4. Некои својства на високо перформансни термопластични полимерни матрици
- Табела 2.5. Споредбена анализа на термореактивни и термопластични полимерни матрици
- Табела 2.6. Предности и недостатоци од примената на препрег материјали
- Табела 4.1. Список на фактори кои влијаат на излезот од автоматизираниот процес на полагање со примена на ласер за загревање
- Табела 5.1. План матрица на експериментот
- Табела 6.1. Карактеристики добиени од производителот Suprem за UD препрег материјалите
- Табела 6.2. Карактеристики добиени од производителот Toho Tenax за UD препрег материјал
- Табела 6.3. Кодирање на факторите за сите примероци
- Табела 6.4. Услови на експериментите
- Табела 6.5. Процесни параметри за експериментите на примерок со ознака LATL-UD3
- Табела 6.6. Услови на полагање на примероци со ознака LAFP-UD3 со AFP постапка
- Табела 6.7. Услови на компресионо пресување
- Табела 7.1. Резултати за максимална сила до кршење за примероци LATL-UD1
- Табела 7.2. Резултати за максимална сила до кршење за примероци LATL-UD2
- Табела 7.3. Резултати за максимална сила до кршење за примероци LATL-UD3
- Табела 7.4. Резултати добиени за напрегање при свиткување за примероци LATL-UD1, LATL-UD2, LATL-UD3
- Табела 7.5. Резултатите од пресметаната дисперзија за секоја серија добиени резултати за LATL-UD1
- Табела 7.6. Резултати од пресметките на вредностите на коефициентите, β_i
- Табела 7.7. Пресметка на разликите меѓу пресметаните и експериментално добиените вредности

Табела 7.8. Резултатите од експериментите за примероци со ознака LATL-UD2

Табела 7.9. Резултати од пресметките на вредностите на коефициентите, β_i

Табела 7.10. Пресметка на разликите меѓу пресметаните и експериментално добиените вредности

Табела 7.11. Резултатите од експериментите за примероци со ознака LATL-UD3

Табела 7.12. Резултати од пресметките на вредностите на коефициентите, β_i

Табела 7.13. Пресметка на разликите меѓу пресметаните и експериментално добиените вредности

Табела 7.14. Пресметани вредности за напрегање при свиткување според добиените регресиони равенки и експериментално добиени вредности

Табела 7.15. Резултати добиени за напрегање при свиткување за примероци LAFP-UD3

Табела 7.16. Добиеени средните вредности за напрегања при свиткување за примероци со ознака LAFP-UD3 и LATL-UD3

Табела 7.17. Резултати добиени за напрегање при свиткување за примероци CM-UD1, CM-UD2 и CM-UD3

1. ВОВЕД

Како што постои развој во индустријата на алатни машини, со кој голем дел рачни операции се заменети со автоматизирани CNC машински центри за обработка, така и во производството на композитни структури се развиле технологии од рачно поставување на влакна и ленти до автоматизирани процеси. Меѓутоа, производството на композитните структури бара примена и на други дополнителни процеси.

Често, за добивање на композитни структури се користи процес со рачното полагање на слоеви од композитен препрег. Предноста на производниот процес со рачното полагање е во тоа што за оваа постапка нема потреба од скапа опрема, а може да се произведат делови со комплексна форма. Главниот недостаток на овој производен процес е тоа што квалитетот на композитната структура зависи од искуството на работникот, а дополнително, самиот процес е многу бавен. Затоа, голем број производители кои се занимаваат со производство на структури со врвни карактеристики, особено такви наменети за авионската или автомобилската индустрија, применуваат други, по ефикасни техники, како што е производниот процес со автоматско полагање на влакна (Automated Fiber Placement - AFP) или ленти (Automated Tape Laying - ATL). Суштината на овие производни процеси се состои во автоматско полагање на влакна/ленти и оформување на слој, кој се спојува со претходниот се до формирање на крајната структура. За автоматското полагање на лентите или влакната се користи роботизирана инсталација за да ги насочи лентите по претходно дефинирани патеки, што овозможува голема слобода во дизајнирањето на крајниот производ. Овој производен процес има голем потенцијал за флексибилно и автоматизирано производство на лесни структури со врвни карактеристики, односно има висока продуктивност и ниска потрошувачка на енергија. Автоматизацијата на процесите ги намалува трошоците за работна сила, како и трошоците поврзани со отпад и губитоци поради човечки грешки. Автоматизираното полагање на ленти претставува една од поновите производни технологии кои сеуште се истражуваат и унапредуваат, а се перспективна технологија за авионската и други индустрии [1, 2].

Современите композитни структури во денешно време се добиваат со користење на зајакнувачки влакна и термореактивна полимерна матрица. Меѓутоа, тие производни процеси се многу бавни поради тоа што се проследени со долги циклуси на печење на

терморективните полимерни матрици (смоли). Тоа може да биде подобро доколку за нивното добивање се користат термопластични полимерни матрици.

Денес постојат релативно мал број на производители на роботизирана опрема во светот за добивање на терморективни и термопластични композити. Придобивките од примената на автоматизираната технологијата, во кои спаѓаат и современите роботизирани технологии, се следните:

- Заштеда на материјал и работна сила.
- Подобрување на квалитетот.
- Точно поставување на ленти под било кој агол.

Повеќе од шест децении, композитните материјали, чекор по чекор, стануваат основни материјали за добивање на композитните структури кај комерцијалните авиони. Тие се покажале како докажан материјал за дизајнирање и производство на одговорни делови од композитен материјал, со потребна јакост и мала порозност. За добивање на такви одговорни композитни делови со помалку од 2% порозност се прави консолидација и изложеност на висока температура и притисок во автоклав со цел да се добие подобро поврзување на слоевите. Автоклавиот е тесно грло во процесот на производство и постојат напори ширум светот да се развие произведен процес *надвор од автоклав* (Out of Autoclave - OoA) [2-4]. Така, развојот на произведен процес *надвор од автоклав* претставува предизвик во истражувањата во оваа област, а целта е да се елиминира дополнителниот процес со примена на скапа опрема – систем со автоклав печка. Тоа може да се постигне кога во производниот процес се користат термопластични композитни влакна или ленти. Покрај многуте предности на термопластичните материјали, сепак, нивната примена за добивање на композитни структури со врвни карактеристики се одвива побавно и сеуште постојат бројни истражувања за нивно користење. Главната предност во добивањето на термопластични композити во споредба со терморективните композити е намалувањето на времето на производниот процес. Термопластичната матрица може повеќекратно да се топи, формира и втврдува што дозволува примена на технологии за брзо формирање, а исто така овозможува примена на напредни методи како што се индуктивно или ултразвучно спојување, кое дозволува автоматизирано спојување на релативно едноставни делови, користени кај комплексни структури. Од друга страна, технологијата за полагање на ленти има огромен потенцијал за автоматизација. Примената на ласер за загревање може да ја зголеми енергетската ефикасност на процесот. Влезната енергија може да се

контролира брзо и точно, а исто така и големината и локацијата на загреаната област може да се контролираат со висок степен на точност. Ласерското загревање овозможува висока продуктивност, но и покрај тоа, производниот процес со автоматското полагање на ленти и загревање со помош на ласер сеуште е во првите фази од развојот, а неговата индустриска апликација е во мали размери. Ова се должи на сложеноста на процесот кој што бара оптимизација на голем број на влијателни параметри и примена на експериментални методи и проби кои водат кон дополнителни материјални трошоци [5].

Оптимизацијата на параметрите за роботизиран процес за автоматизирано полагање на термопластичен препрег (AFP/ATL) и загревање со помош на ласер со цел производство на ламинати со консолидација на самото место (in-situ) претставува предизвик. Клучот е во употребата на термопластични наместо терморективни матрици. После повеќе од 30 години развој, in situ консолидацијата е близу до остварување на својата цел да го елиминира автоклавот и да овозможи брза постапка за производство на композитни делови за авио и вселенската индустрија. Употребата на in-situ автоматизирана машина (AFP/ATL) за производство на термопластични композити е во подем. Во овие процеси, подвижниот извор на топлина ја топи термопластичната композитна лента и консолидацијата се случува на лице место. Овие системи се опремени со компакциони валјачиња (ролери) кои го притискаат материјалот веднаш по поставувањето за да се обезбеди лепење и да се избегне формирање на воздушни празнини. Поради брзото загревање и ладење на термопластичниот влезен материјал, потребно е решавања на многу прашања: добра дистрибуција на температура во различни насоки, обезбедување на добар квалитет на врска помеѓу слоевите и обезбедување на доволна брзината на полагање на материјалот за да се задоволи бараната продуктивност. Оттука произлегува и мотивацијата за оваа докторска дисертација: да се истражува in-situ консолидацијата на термопластичните композити, со примена на роботите и ласерското загревање. Истражувањата во докторската дисертација се насочени кон решавање на распределбата на температурата и обезбедување на добра поврзаност меѓу слоевите што ќе резултира во добивање на композитна структура со врвни карактеристики. Распределбата на температурата влијае на варијацијата на степенот на кристалност и заостанатите напони низ целата структура која што се формира. Како резултат на тоа можни се искривувања на композитниот ламинат дури и за време на самиот процес на негово создавање. Затоа, од голема важност е решавањето на овој и други слични проблеми.

Решавањето на мноштво проблеми во подобрувањето на процесите, често е поврзано со изведување на сложени и скапоцени експерименти. Оттука е разбирливо значењето на постоењето на методологии за подобрување на процесите кои содржат различни начини и методи за оптимално планирање на експериментите, кои во низа случаи овозможуваат суштествено да се скрати времето и материјалните трошоците при извршување на истражувањето. Планирањето на експерименти (Design of experiments - DOE) дава структуриран статистички пристап кој помага да се разбере кои фактори влијаат на процесот, а потоа врз основа на тие сознанија да се создаваат значајни и ефективни тестови за верифицирање на можностите за подобрување на процесите, производите, услугите, идеите или теориите [11].

Производството на термопластични композитни структури со *in-situ* автоматизирани постапки е од големо значење бидејќи се однесува на стандардни типови на композитни структури кои се во директна конкуренција со постарите типови, како што се термореактивните композити или металните структури. Индустриската важност на процесот е голема затоа што добиените композитни структури со овој процес се долготрајни и издржливи и претставуваат одговорни носечки делови, најчесто за авионската или автомобилската индустрија. Затоа, особен научен, но и практичен предизвик претставуваат истражувањата на *in-situ* автоматизирани процеси за добивање на термопластични композитни структури на самото место, нивната оптимизација или подобрувања на параметрите на процесот како и нивната карактеризација.

Оттука произлезе и мотивот и определбата за оваа докторска дисертација.

Мотивација за истражувањето

Во рамките на оваа докторска дисертација применети се *роботизирани AFP/ ATL процеси* за добивање на високо квалитетни термопластични композитни структури на самото место. Темата која што е предмет на овој докторски труд, опфаќа област која не е доволно публикувана во споредба со другите области од доменот на композитните материјали. Затоа, овие роботизирани постапки се од интерес за продлабочено научно истражување.

Врз основа на објавените трудови за примената на роботизираните ATL/AFP постапки за добивање на композитни структури врз основа на термопластичен препрег, генералниот пристап е дека консолидацијата мора да се прави со понатамошно процесирање во автоклав или со преса, што предизвикува одложување на целиот процес. Затоа, автоматизираната технологијата за полагање на термопластичен препрег со помош на робот и загревање со помош на ласер претставува предизвик за истражување со кое би се дефинирале технолошките параметри на самиот процес и кои ќе овозможат добивање на композитна структура на самото место, без дополнително процесирање.

Истражувањата што ќе произлезат од овој труд ќе имаат пред сè апликативен карактер за производните претпријатија кои се поврзани со производство на композитни материјали поради тоа што се очекува со примената на роботизираните AFP/ATL постапки да се обезбеди поголема продуктивност, ниска потрошувачка на енергија и добивање на високо квалитетни композитни структури.

Исто така, истражувањата имаат и научен пристап изразен преку анализа на роботизиран процес за автоматско полагање на композитни влакна/ленти и нивно загревање со ласер, како и примена на научни методи за планирање на експерименталните истражувања и анализата на карактеристиките на структурата на композитот.

Предмет и цели на истражувањето

Во фокусот на истражувањата за докторската дисертација се автоматизираните ATL/AFP постапки со примена на робот и загревање со примена на ласер за добивање на композитни структури без дополнително процесирање. Во таа насока се разгледуваат и анализираат автоматизираните постапки, се анализираат различни типови материјали кои може да се применат како и методите за оптимизација на технолошките параметри.

Предмет на истражување во докторската дисертација е анализа на влијанието на одредени технолошки параметри врз квалитетот на произведените термопластични композитни структури. За истражувањата применети се разни типови на термопластични унидирекционални ленти (препрег материјали), а истите процесирани се со примена на роботизирани постапки за добивање на композитни производи на самото место.

Целта на истражувањата во докторската дисертација е:

- Да се дефинираат технолошките параметри на роботизирани AFP/ATL производни процеси кои ќе овозможат добивање на композитна производи на самото место, без дополнително процесирање во традиционална автоклав печка или во преса.
- Да се споредат произведените композитни производи со примена на автоматизирани постапки со композитни производи произведени под исти услови со традиционална постапка на компресионо пресување со користење на преса.
- Да се покажат предностите од примена на роботизирани постапки за производството на композитните производи.

Работната хипотеза во предметната тема, во суштина, се темели на претпоставката дека со избор на технолошки параметри и развој на оптимизирани услови за процесирање на термопластични унидирекционални ленти со роботизирани постапки преку примена на планирање на експериментите, ќе се овозможи добивање на делови од термопластичен композитен материјал, без дополнително процесирање.

1.1. Структура на докторската дисертација

Докторската дисертација структурирана е во осум глави односно покрај воведот (*Глава 1*), содржи уште седум глави.

Во *Глава 2 – Теоретски основи на композитни материјали*, се дадени основни информации за композитни материјали и елементите кои ги сочинуваат. Потоа, разјаснет е ефектот на зајакнување со влакна и дадена е анализа на полимерните матрици. Одделно, дадени се основните информации за термопластичните матрици, предностите и недостатоците од нивна примена, а посебно се разгледани високоперформансните термопластични полимерни матрици. Потоа, презентирани се најчесто применуваните постапки за производство на структурни од композитни материјали.

Во *Глава 3 - Планирање на експерименти*, дадени се основните принципи и стратегијата на експериментирањето. Потоа, презентирана е постапката за планирање на експерименти. Изборот на план на експериментот, вклучува размислување за избор на прелиминарен емпириски модел за толкување на резултатите. Моделот всушност претставува квантитативна поврзаност меѓу одзивот и влијателните врз него дизајн фактори. Презентирани се најчесто користените математички модели од прв ред за

планирање на експериментите. На крај, дадено е објаснување за факторното планирање на експериментите.

Во **Глава 4 – Автоматизирани постапки при производство на композитни делови**, опишани се детално автоматизирани постапки за полагање на термопластоични унидирекционални ленти ATL и влакна AFP, нивните разлики, нивната соодветна примена како и производителите на машини за ATL и AFP. Исто така, во оваа глава објаснети се можните машински конфигурации за автоматизирано полагање на влакна и ленти, а посебно е објаснета машинската конфигурација со примена на роботска рака која што всушност се применува во истражувањата од оваа докторската дисертација. Наведени се и предностите и придобивките од примената на овие постапки за добивање на делови од композитни материјали. Во посебно поглавје, објаснета е роботизираната постапка за автоматско полагање на препрег материјал со примена на ласер за загревање и концептот на *in situ* консолидација при што дадена е анализа на оптичкиот феномен којшто настанува кога зракот од ласерот го погодува композитниот материјал. Дадени се факторите кои влијаат на автоматизирани процеси на полагање со примена на ласер за загревање и истите сликовито се претставени. Во други посебни поглавја објаснети се детално клучните фактори при процесирање на термопластичен препрег материјал: интимен контакт меѓу слоевите, автохезија, поврзување и кристалност, кои најмногу влијаат на формирање на јака врска меѓу слоевите за добивање на композитна структура на самото место со добар квалитет. На крај, во последното подглавје од оваа глава, даден се актуелни истражувања за роботизираните ATL/AFP постапки за добивање на структури од композитни материјали.

Во **Глава 5 – Предложен модел за работа**, објаснет е предлог моделот за работа за добивање на структури од композитни материјали со роботизирани постапки на самото место, без дополнително процесирање. Имено, во оваа глава се дефинирани, анализирани и мерени влезовите на автоматизираниот процес за производство на делови од композитни материјали на самото место и со користење на план на експерименти, направен е предлог на модел за работа кој ќе одговори на поставената цел – определување на најповолни технолошки параметри за добивање на структура од композитен материјал без дополнително користење на автоклав или друга дополнителна опрема.

Во **Глава 6 – Експериментален дел**, прво се презентирани конститутивните материјали кои беа користени за производството на композитни плочи. конститутивните

материјали кои се користени за производството на композитни плочи во ова истражување. Потоа, објаснети се избраните фактори кои најмногу влијаат на процесот како и минималната и максималната граница на варирање на тие фактори. Врз основа на тоа, направена е план матрица на експериментите согласно која се реализирани експериментите односно се произведени ламинатни плочи при различни услови. Во оваа глава, презентирани се методите кои се применуваат за карактеризација на добиените ламинатни плочи, односно јакост при свиткување и микроскопски анализи на микроструктурата.

Во *Глава 7 – Анализа на резултатите*, презентирани се анализите на добиените резултати од сите направени тестирања на произведените примероци ламинатни плочи. Имено, добиени се регресиони равенки, определена е значајноста на анализираните технолошки параметри како и направена е проверка на моделите односно определена е нивната адекватност. Во оваа глава, за сите произведени ламинатни плочи, во посебни поглавја, направена е темелна анализата на влијанието на факторите врз јакоста на врска меѓу слоевите, преку определување на јакост при свиткување на примероците и преку анализа на снимки од оптички и електронски микроскоп на нивните попречни пресеци.

Во *Глава 8 – Заклучок и насоки за понатамошни истражувања*, резимирани се заклучоците на тезата, вклучувајќи го нејзиниот главен придонес, како и препораките за понатамошни истражувања. Во оваа глава, дадени се завршни констатации во врска со применетите роботизирани постапки за автоматско полагање на композитни влакна/ленти и добиените модели за производство на композитни делови на самото место, без дополнително користење на автоклав или друга дополнителна опрема. Исто така, дадени се заклучоци и за карактеристиките на плочите добиени од разни типови термопластични композитни материјали со примена на роботизираните AFP/ATL технологии и насоки за понатамошни истражувања и подобрувања на процесите.

2. ТЕОРЕТСКИ ОСНОВИ НА КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ

2.1. Композитни материјали

Во последните години расте интересот за нови современи композитни материјали поради потребата од материјали со невообичаена комбинација на својства, кои не можат да бидат исполнети од страна на постоечките конвенционални материјали: метали легури, керамика и полимерни материјали. Во голем број индустрии потребни се материјали коишто имаат мала густина, голема јакост и тврдина, отпорност на абразија и отпорност на удар и коишто не кородираат. Таа комбинација на својства може да биде реализирана со композитните материјали. Тоа лежи во основата на создавањето и постоењето на композитните материјали кои претставуваат повеќефазен систем во кој постои значајна пропорција на својства на двете конститутивни фази, а притоа, самиот композит има супериорни својства во однос на одделните компоненти. Композитите се повеќефазни материјали во коишто составните фази се хемиски различни и одвоени со посебен интерфејс (област на поврзување). Во дизајнирањето на композитните материјали, научниците и инженерите имаат можност со соодветна комбинација на различни метали, керамика и полимери да креираат нова генерација материјали со невообичаени својства. „Ако еден материјал не може целосно да ги исполни сите конструктивни барања, два или повеќе материјала можат“ [12].

Се поставуваат две основни барања при дизајнирањето на структурните компоненти на композитните материјали: 1. деформациите при оптоварувањето мора да бидат во рамките на пропишаните барања и 2. композитната структура мора да биде отпорна на оштетување во предвидениот период. За да биде тоа задоволено, потребни се информации за две важни механички карактеристики на композитниот материјал, а тоа се: крутоста и јакоста. Најголем дел од композитните материјали кои се развиени во последните години се произведени токму со цел да се подобрат нивните механички карактеристики - јакоста, крутоста, жилавоста, како и отпорноста на високи температури [12, 13].

Зборот композит (Composite) дословно значи „направен од неколку дела“. Композитниот материјал е систем составен од два или повеќе елементи, т.е. материјал кој содржи две или повеќе различни конституенти или фази. Оваа дефиниција важи само во случај кога конституентите имаат значително различни физички карактеристики и поради тоа композитните материјали имаат особини кои се различни од особините на конституентите. Попрецизната популарна дефиниција за композитите подразбира само неметални материјали кои се состојат од влакнести зацврстувачи, како што се стакло, јаглород или кевлар, инкапсулирани во стврдната матрица на еден од неколкуте стотици полимерни материјали. Овие композитни материјали се карактеризираат со нивните релативно високи соодноси јакост/тежина во споредба со традиционалните метални компоненти [14].

Значајно истражување, развој и напредок се остварени, исто така, и во сферата на композитните материјали со метална и со керамичка матрица (Metal Matrix and Ceramic Matrix Composites), но композитите со органска матрица (Organic Matrix Composites) имаат многу пораспространета примена [14].

Од широкото семејство на композити, композитите зајакнати со долги континуирани влакна имаат голема примена, посебно во авионската, вселенската, автомобилската и други водечки индустрии.

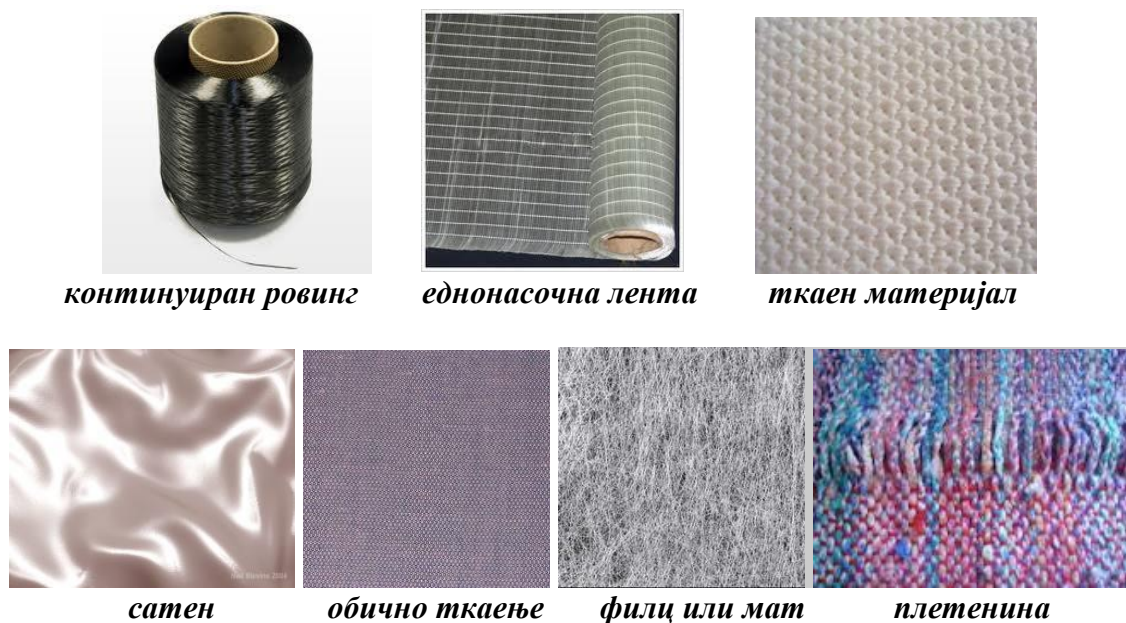
2.2. Структурни елементи кај композитните материјали

Композитите се материјали кои ги сочинуваат два основни елемента, од кои едниот се нарекува матрица (matrix) или основен материјал, која е континуирана фаза, во која се додава другата компонента, зајакнувачот (reinforcement), со цел постигнување на неопходната комбинација на својства: цврстина, густина, крутост, тврдина, топлинска и електрична спроводливост. Важно е да се разбере дека за најголем дел композитни делови, зајакнувачот ја дава потребната јакост и крутост на композитниот материјал, а матрицата или врзивното средство е неопходно за поврзување, одржување позиција и ориентација на зајакнувачот и за пренесување на оптоварувањето меѓу зајакнувачите во сите насоки. Составните делови на композитот ги задржуваат своите индивидуални, физички и хемиски својства, но со заемна интеракција се добиваат композитни материјали, со карактеристики кои се супериорни во однос на конституентите што ги сочинуваат. Својствата на композитите се функција на својствата на конститутивните

фази, нивната релативна вредност и геометријата на дисперзираната фаза. Под „геометрија на дисперзирана фаза“ се подразбира обликот и големината на честичките, нивната дистрибуција и ориентација. Кај сите видови композитни материјали механизмот на зајакнување зависи од геометријата на зајакнувачот. Композитите зајакнати со континуирани влакна имаат најдобри механички особини. Тие тешко се приспособуваат за масовно производство и се ограничени на производи каде што предностите во својствата ги оправдуваат трошоците [15, 16].

2.2.1. Зајакнувачки материјал

Има многу материјали кои можат да се користат како зајакнувачи, но во технологиите на современите композити доминираат: стаклените, јаглородните и арамидните влакна. Доколку е потребно, за одредена примена 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 ориентираните влакна. Сите овие форми обезбедуваат извесна предност, но и ограничување на композитната структура во однос на процесот на обликување, економичноста и естетиката [14-16].



Слика 2.1. Различни форми на зајакнувачки материјал

Предностите на различни типови на влакна се претставени со следниве основни карактеристики [16]:

- Стаклени влакна - пониска цена.
- Јаглеродни влакна – крутост.
- Арамидни влакна - отпорност на удар.
- Борон влакна - висок модул на еластичност.
- Силикон карбидни - издржливост на висока температура.

Првите три фамилии на зајакнувачки материјали се одликуваат со мала густина и голема јакост. Стаклените влакна се ефикасни од аспект на однос јакост/тежина, и се со пониска цена. Јаглеродните влакна имаат повисока јакост и модул на еластичност на истегнување. Нивните специфични модули на истегнување се повисоки од челикот, но се зајаквачи со повисока цена. Кевларот како органско арамидно влакно, обезбедува добри својства на истегнување и одлична отпорност на удар [16].

Некои механичките карактеристики на најчесто користените континуирани влакна се дадени во табела 2. 1.

Табела 2.1. Карактеристики на најчесто користени синтетички влакна [16]

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

2.2.1.1. Ефект на зајакнување со влакна

Својствата на композитот зависат од својствата на конститутивните фази, нивните удели, геометријата на зајакнувачот и адхезијата 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, при што се разликуваат композити со дисперзирани честичи, со кратки и со бесконечни

влакна [16-19]. Во табела 2.2 дадена е класификација на композитите според геометријата на зајакнувачот. При оваа класификација основен параметар е соодносот на максималната (должината - l) спрема минималната димензија (дијаметарот - d) на зајакнувачот, т.н. карактеристичен сооднос l/d (aspect ratio). Композитите со дисперзирани честици претставуваат еден од крајните случаи кога тој сооднос е еднаков на единица, додека оние со континуирани влакна се другиот краен случај кога соодносот е еднаков на бесконечност. Композитите со кратки влакна, кај кои соодносот на должината кон пречникот обично е од 10 до 1000, се наоѓаат помеѓу овие два крајни случаи [19 - 22]. Потенцијалниот ефект на зајакнување кај трите типа композити може да се оцени од слика 2.2.

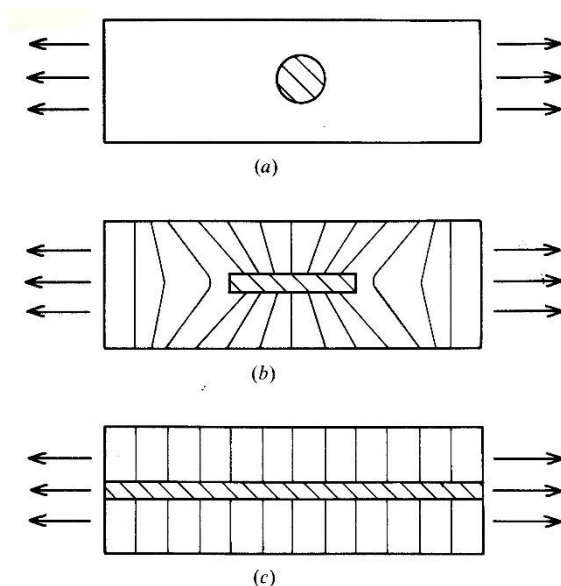
Табела 2.2. Класификација на композитите [18]

КОМПОЗИТИ						
Зајакнати со честици		Зајакнати со влакна			Структурни	
Големи честици	Дисперзирано зајакнати	Континуирани (насочени)	Дисконтинуирани (кратки влакна)		Ламинати	Сендвич структури
			насочени	случајно ориент.		

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

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

со кратки влакна, иако напрегањето се приложува само на матрицата, тоа може делумно да биде пренесено на краткото влакно доколку постои висока адхезиона јачина или високо триење на границата на разделба влакно-матрица.



Слика 2.2. Влијание на карактеристичниот сооднос l/d на честичките на полнилото врз распределбата на напрегањата во матрицата: а) $l/d=1$, сферна честичка; б) кратко круто влакно, $l/d=10-1000$; в) бесконечно крто влакно, $l/d=\infty$ [20]

2.2.2. Матрици кај композитите

Како матрици кои се користат кај композитите се:

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

Полимерните матрици за композитите се делат на термореактивни (thermoset) и термопластични (thermoplastics). Тие се присутни обично со 30 - 40 % во композитот и покрај основната функција - да ја обедини дисперзираната фаза и да го сочува обликот на композитот, тие исполнуваат различни други функции [23]. 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. Матрицата го распределува оптоварување и игра улога на пренесувач на

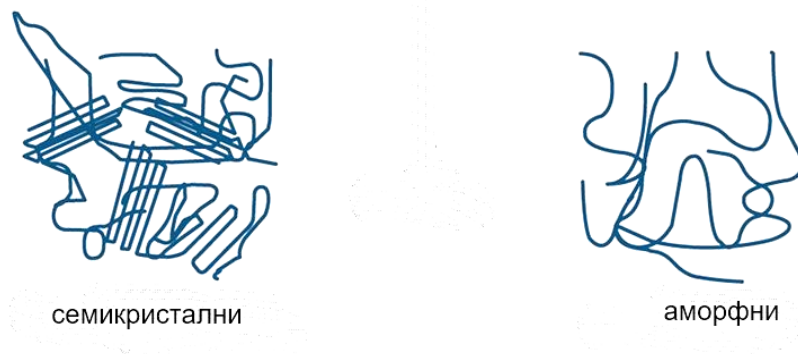
напрегањето, и кога индивидуалните зајакнувачи попуштаат, композитната структура не ја губи својата способност и натаму да издржува оптоварување. Меѓуслојната жилавост, јакоста на смолкнување, компресија и попречната јакост на композитот се, исто така, зависни од матрицата. За да бидат исполнети сите овие функции, поврзувањето меѓу зајакнувачката фаза и матрицата треба да биде добро. Фрактурите кај композитниот материјал се резултат на комбинираното однесување на зајакнувачот, матрицата и интерфејсот помеѓу нив [24 - 28].

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

Други терморективни смоли како што се полиестрите и епоксидите се вмрежуваат без издвојување на испарливи супстанции и тие се многу полесни за процесирање. Еднаш вмрежените терморективни полимери не можат да преминат повторно во течност при загревање, но над одредена температура нивните механички својства значително се менуваат. Оваа температура е позната како температура на стакленисување (Glass transition temperature - Tg). Таа е различна за различни полимерни системи [28-30].

Термопластичните полимерни матрици при загревање омекнуваат или се топат, а при ладење повторно се втврднуваат. Овој процес може да биде често повторуван, при што во полимерот не се случуваат хемиски промени. Термопластичните полимери кои се со аморфна структура каде макромолекулите се безредно распределени, можат да се поделат на две групи: кристализирачки и некристализирачки полимери. Степенот на разгранување и регуларноста на макромолекулите на термопластичниот полимер се фактори кои ја зголемуваат можноста за кристализација. Меѓутоа, целосна кристализација никогаш не настанува и затоа оваа група на полимери се именуваат како полукристални или семикристални термопластични полимери. На слика 2.3 прикажан е сликовито степенот на регуларност на макромолекулите кај семикристални термопластични полимери и аморфни полимери каде макромолекулите се безредно распоредени и не постои никаква регуларност. За инженерски цели, важно е да се

Класифицираат термопластичните полимери во однос на нивната максимална континуирана употреба на соодветна температура која е во зависност од степенот на регуларност на макромолекулите. Постојат три класификации на термопластични полимери: тие што се користат на температури пониски од 100°C, потоа втора група помеѓу 100°C и 150°C и трета група над 150°C [27,28]. Најчесто користени термопластични полимери, нивната кратенка и примена, се наведени во Табела 2.3. Класификацијата на термопластичните полимери според цената, перформансите и употребата сликовито е претсавена на Слика 2.4.



Слика 2.3. Семикристални и аморфни термопластични полимери [26]

Во принцип, корисни својства на термопластичните полимери се високата отпорност на околината, одлична јачина на удар, можноста за рециклирање и реформабилност [23]. Сепак, треба да се напомене дека полиетиленот е термопластичен полимер кој широко се употребува на пример за пластични кеси, но постои и полиетилен со ултра висока молекуларна тежина (Дунеета[®] високи перформансни влакна). Неговата примена е главно за балистички елеци за заштита од куршуми или за оптички кабли и др. специфични апликации [24, 25]. Разликата помеѓу полиетилен за пластичната кеса и Дунеета[®] влакната е во ориентацијата на молекуларната структура. Кај полиетилен наменет за пластични кеси, молекулите имаат прилично случајно и неорганизирана распределба, додека, молекулите во Дунеета[®] влакната се ориентирани и подредени на организиран начин, давајќи му на материјалот високи перформанси.

Табела 2.3. Класификација на најважните термопластични полимери во однос на нивната употреба [27]

Термопласти со широка примена (< 100 °C)	Примена
Полиетилен - Polyethylene (PE)	цевки, корпи, кеси за пакување
Полипропилен - Polypropylene (PP)	vlakна, цевки, фолии за пакување
Полистирен - Polystyrene (PS)	пена за пакување, чаши за кафе
Поливинилхлорид - Polyvinylchloride (PVC)	цевки, кабелска обвивка, шишиња
Инженерски термопласти (100 – 150 °C)	Примена
Полиамид - Polyamide (PA)	лежишта, vlakна, запчаници
Поликарбонат - Polycarbonate (PC)	замена за стакло
Полиетилен терефталат - Polyethylene Terephthalate (PET)	шишиња, фолии, vlakна
Акрилонитрил бутадиеен стирен - Acrylonitril-butadiene styrene (ABS)	играчки (LEGO®), телефони
Високо перформансни термопласти (> 150 °C)	Примена
Поли етер етер кетон - Polyether Ether Ketone (PEEK)	цевки, завртки
Полифенилен сулфид - Polyphenylene Sulfide (PPS)	вентили за враќање на издувните гасови, делови за карбуратор
Полиетеримид - Polyetherimide (PEI)	печатач
Полиетерсулфон - Polyethersulfon (PES)	куќиште за батерија
Политетрафлуоретилен - Polytetrafluorethylene (PTFE)	лежишта, облоги



Слика 2.4. Класификација на термопластични полимери во однос на нивната употреба и цена

2.2.2.1. Високоперформансни термопластични полимерни матрици

Во областа на термопластични полимерни матрици со високи перформанси, полиетеретеркетонот (PEEK) и полифениленсулфидот (PPS) се најшироко користени термопластични полимери, а не помала примена има и полиетеркетонкетон (PEKK). Повеќето термопластични производи имаат полукристална морфологија на полимерот и степенот на кристалност никогаш не надминува 90%. Кристалноста во полимерите е важна бидејќи има силно влијание врз хемиските и механичките својства. Во поширока смисла, кристалноста има тенденција да ја зголеми крутоста и јакоста на истегнување додека аморфните области ја даваат еластичноста и се поефикасни во апсорпцијата на енергијата на ударот. Степенот на кристалност е одреден од многу фактори, вклучувајќи го типот на полимерот и условите за процесирање. При процесирање на одреден тип на полимер, полимерните кристали се формираат за време на ладењето од стопена состојба. Процесот ладење е клучен параметар за одредување на степенот на кристалност [22 - 26].

Термопластичниот полимер PEEK се карактеризира со висока температура на топење (T_m) и висока температура на стаклен премин (T_g). Тој формира делумно кристална полимерна морфологија која има голема отпорност на хемикалии, зрачење и термичка оксидација. Термопластичниот полимер PPS има понизок T_g и T_m од PEEK, но е

исклучително термички стабилен, има својства на отпорност на пожар, може да достигне високо ниво на кристалност и е отпорен на многу органски растворувачи [28,29,31]. Типични својства на некои високоперформансни термопластични полимери се дадени во Табела 2.4. РЕЕК се користи за изработка на материјали кои што се користат при високи работни температури. Зајакнат РЕЕК со јаглеродни влакна се користи за изработка на одговорни и носечки делови за авиони, сателити и други делови за авионската и вселенската индустрија и истите можат да се користат при континуирана температура до 250 °C. Температурата при која настанува точката на стакленисување (Tg) за РЕЕК изнесува 143-149°C, а температурата на топење е ~365 °C. Причината поради која што денес се користи многу во авионската индустрија освен изложеноста на високи работни температури е исто така и голема толеранција при настанато оштетување на материјалот како и малата апсорпција на вода (10 пати помала од епоксидните смоли). Апсорпцијата на вода кај РЕЕК изнесува 0,5% на собна температура додека во вселената изнесува 4-5% [31]. РЕЕК зајакнат со јаглеродни влакна се произведува на температури од 380 до 400 °C за процесирање во автоклав или компресионо пресување, додека при процеси со намотување потребно е да се постигне поголема температура дури и до 500 °C за подобро спојување на траките. Кристалноста на РЕЕК е од 30 до 35%, а максимум 40%. Тие имаат 50 до 100 пати поголема јакост од епоксидните смоли [28,29].

PPS е термопласт кој може да има максимална кристалност од 65%. Овозможува работа на високи температури и може да се употребува континуирано на температури до 225 °C. Точката на стакленисување (Tg) на PPS е на температура од 80-95 °C, а точката на топење е на температура од 285 °C [31]. Препрег траките од PPS можат да се најдат со повеќе видови на зајакнувачи. Композитните структури врз основа на PPS се користат за апликации каде што е потребна висока јачина и хемиски отпор при повисоки температури.

РЕКК е семикристален термопластичен материјал кој е развиен во 1980тите од DuPont како термопластична матрица со високи перформанси за современи композити. Композитните ламинати коишто се изработени со РЕКК матрица и јаглеродни влакна како зајакнувачи имаат високи јачини при свиткување, смолкнување и компресија и добра стабилност во надворешни услови т.е. при топли и влажни средини. Температурата на стакленисување Tg изнесува 156 °C, додека температурата на топење е во ранг од 300°C до 310°C. РЕКК е преферирана матрица при употреба на композитот

на температури >90 °C. РЕКК композитите можат да бидат произведени со кратки и долги стаклени и јаглородни зајакнувачи. Покажува одлична издржливост при зголемени температури и при влага и е отпорен на оштетувања предизвикани од флуиди, употребувани во авионската индустрија. Модулот на еластичност при истегнување изнесува 4,5 GPa со што се објаснуваат високите перформанси на композитите коишто се произведени со РЕКК матрица [31]. Јачината при компресија на унидирекционален препрег со РЕКК матрица и јаглородни влакна е помеѓу најголемите измерени за термопластични композити со високи перформанси.

Табела 2.4. Некои својства на високо перформансни термопластични полимерни матрици [31]

Својства	Единица	PES	PEI	PPS	PEEK	РЕКК
Структура	g/cm ³	аморфни		семикристални		
Густина	g/cm ³	1,4	1,35	1,43	1,33	1,28
Јачина на истегнување	MPa	99	100	87	110	110
Модул на еластичност при истегнување	GPa	3,7	3,7	3,6	4,5	4,5
Температура на стаклен премин, T _g	°C	230	220	88	143	136
Темпертура на топење, T _m	°C			285	334	300-310
Работна температура	°C	200	200	160	260	250
Кристалност	%			0-65	0-40	0-50
Линеарен коефициент на термичка експанзија	K ⁻¹	55·10 ⁻⁶	62·10 ⁻⁶	49·10 ⁻⁶	47·10 ⁻⁶	49·10 ⁻⁶

2.2.2.2. Предности и недостатоци на термопластичните полимерни матрици

Предностите на термопластичните полимерни матрици во споредба со конвенционалните термореактивни смоли на пример епоксидните, се следните [22, 25, 28]:

- **Имаат долг рок на траење**

Бидејќи термопластичните смоли не се вмрежуваат преку хемиска реакција, тие не мора да се чуваат на ладно. Термопластичните полимери се веќе „вмрежени“ кога се почнува да се работи со нив, а за да се формираат во конечниот облик, се употребува топлина и притисок. Овој долг рок на траење е голема предност и ги избегнува проблемите со старост на материјалот и со неговото складирање.

- **Постојат повеќе опции за нивно процесирање**

За термопластичните полимери се достапни многу видови на методи на производство. Тие вклучуваат компресионо обликување, пултрузија, намотување на влакна (filament winding) и термоформирање. Препрег материјалите се направени од зајакнувачки влакна пред-импрегнирани со термопластична смола, кои исто така, можат да се користат за производство на композитни делови со дополнително процесирање и употреба на автоклав како и терморективните материјали.

- **Кратко време на процесирање**

Избраната техника за производство значително влијае на времето на процесирање, а најголемиот дел од времето се троши на топење на термопластот и компактирање на делот. Делот потоа мора да се олади со одредена брзина со цел да се овозможи правилен степен на кристализација на полимерот. Во некои процеси, единствените ограничувачки фактори при процесирање на термопластичните полимери се тоа колку брзо материјалите може да се загреваат и ладат. Позитивно и е тоа што многу процеси за обработка на термопластични материјали можат лесно да се автоматизираат.

- **Добра отпорност на удар**

Термопластичните полимери имаат добра јакост во однос на незајакнатите епоксидни смоли, но мора да се нагласи дека композити направени од овие термопластични полимери не мора да имаат подобра јакост од тие врз основа на терморективни полимери. Незајакнатата термопластика може да претрпи големи оптоварувања без да се наруши нејзината структура. Низа истражувања [22, 25] покажале дека изложените на затегање терморективни композити имаат отпорност на удар слична на термопластичните композити, понекогаш дури и подобра. Сепак, оштетувањата полесно можат да бидат откриени кај термопластичните композити, бидејќи површината се деформира и се формира физички видлива промена.

- **Способност за повторно формирање**

На температури над температурата на топење термопластот ќе се стопи и ќе тече и може повторно да се формира во друга форма. Уште еден добар аспект на термопластичните полимери е дека тие може да бидат репроцесирани со употреба на високи температури и притисоци.

- **Ниска апсорпција на вода**

Степенот на апсорпција на вода за многу термопластични полимери е многу мал. РЕЕК и PPS смолите покажуваат содржина на влага од околу 0,1% во топли и влажни

услови во споредба со содржина на влага од околу 3% или повеќе за многу епоксидни смоли. Внесувањето на влагата резултира во намалување на механичките својства затоа што влагата во полимерната матрица доведува до формирање на празнини и слабо поврзување на слоевите односно лош интерфејс. Термопластичните композити покажуваат одлични механички перформанси во топли и влажни средини.

- **Висока хемиска отпорност**

Термопластичните полимери покажуваат висока хемиска отпорност на горива и хидраулични течности. Нивната кристална морфологија овозможува да имаат поголема хемиска отпорност. Тоа ги прави идеални за примена во многу средини.

- **Поедноставно производство**

Автоматизираните процеси може да се користат за процесирање на термопластичните полимери, а со тоа значително се намалуваат трошоците за произведениот дел и се компензираат високите трошоци за суровини. Поврзувањето на термопластичните слоеви може да биде едноставен процес бидејќи тие можат да се спојуваат со локално греење. Најголема предност е тоа што не е потребно да се користи скап автоклавен процес за таа цел, а тоа ги намалува и трошоците за енергија.

Недостатоците од примена на термопластичните матрици се следните [22, 25]:

- **Потребни се високи температури на процесирање**

Температурите потребни за процесирање на термопластичните полимери се далеку повисоки отколку кај термореактивните полимери. Типичните температури за обработка на РЕЕК се околу 350°C и повисоки. Конвенционалната опрема за производство, како што се автоклавите, не може да ги постигне овие температури.

- **Потребни се високи притисоци**

Во зависност од процесот на производство, може да се бара голем притисок за да се формира термопластика. Термопластичните полимери се топат на висока температура, но сепак остануваат прилично вискозни што може да влијае на течењето на смола и врз консолидацијата на композитниот дел.

- **Термопластичните полимери имаат висока цена**

Цената на термопластичните смоли е висока, но се очекува да се намали со текот на времето. Цената на термопластичните препрег материјали може да биде и до четири пати поголема од компатибилните епоксидни препрези. Со оглед на тоа што се потребни пократки времиња на обработка на термопластичните материјали и фактот дека многу делови можат да се произведат со употреба на автоматизирана опрема овозможува да се

компензира поголемиот дел од трошоците за суровината. Високо перформасни делови може да се изработат со термопластични препрег материјал, со споредливи и подобри перформанси од истите делови изработени од алуминиум. Дополнително, отпадните термопластични материјали може да се реупотребат односно може се рециклираат.

- **Процедурите за поправка на термопластичните композити сеуште не се доволно развиени** и сеуште не се пошироко распространети во авионска или автоимобилска индустрија.

Во табела 2.5 дадена е споредбена анализа за двата типови полимерни матрици.

Табела 2.5. Споредбена анализа на термореактивните и термопластичните полимерни матрици [28]

ПОЛИМЕРНИ МАТРИЦИ	
Термопластични	Термореактивни
Висок степен на деформација до кршење	Низок степен на деформација до кршење
Неограничен рок на траење	Ограничен рок на траење
Можат повторно да се процесираат	Не можат повторно да се процесираат
Не се лепливи и лесно се ракуваат	Лепливи
Висока температура на процесирање	Ниска температура на процесирање
Кратко време на процесирање	Долго време на процесирање

2.3. Технологии за производство на делови од термопластични композитни материјали

Изборот на производниот процес за добивање на делови од термопластични композитни материјали зависи од типот на применетите материјали (матрица, зајакнувач), температурата потребна за формирање на делот и за вмрежување на матрицата, како и ефективноста на процесот од аспект на трошоците. Избраниот процес на производство мора да е соодветен за добивање на производ од композитен материјал со зададен дизајн, како и да е соодветен во однос на трошоците, обемот на производство и продуктивноста. Поради тоа, конструкторот мора да ги познава предностите и ограничувањата како и типичната примена на различните производни процеси [31-33].

Процесирањето на полимерните композитни материјали ги вклучува следниве операции [17,18]:

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

Најчесто користени технолошки процеси за добивање на термопластични композити се:

- Рачно полагање (Hand lay - up);
- Полагање на препрег (Prepreg lay - up);
- Компресионо пресување (Compression molding);
- Процесирање со автоклав (Autoclave processing);
- Автоматизирани процеси за полагање на препрег (Automated fiber placemant/Automated tape laying AFP/ATL);

Различните производни процеси се разликуваат според начинот на кој операциите се изведуваат. Некои од овие операции може да се комбинираат на едноставен начин со цел да се заштеди на време. На пример, распоредувањето на влакната, поврзувањето и консолидацијата може симултано да се изведуваат кај процесот на полагање на препрег. Некои операции може претходно да бидат изведени, како што е импрегнацијата на препрегот, кој понатаму се користи при рачното полагање. Различните начини на процесирање на материјалите имаат значително влијание врз трошоците, производноста, квалитетот и перформансите на крајниот производ. Секој метод на производство се карактеризира со одредени предности и ограничувања кои влијаат врз конструкцијата, материјалите и карактеристиките на деловите од композитен материјал [17].

2.3.1. Рачно полагање

Технолошката постапка на рачно полагање е наједноставниот и најчесто користениот производствен процес. Во основа овој процес се состои од рачно полагање на зајакнувач во калап и нанесување на полимерна матрица. Потоа, влажниот композит

се поминува со рачни валјаци со цел да се олесни униформната дистрибуција на смолата и да се отстранат воздушните празнини. Овој процес се повторува се додека не се постигне посакуваната дебелина. Емисијата на испарувањата е висока исто како кај кој било друг метод на отворен калап.

Продуктивноста и трошоците за технологијата на рачно положување варираат во широк дијапазон и зависат од влакната и матрицата кои се користат, големината на делот кој треба да се произведе и процесот кој се користи. Трошоците за калапот зависат од бројот на делови кои треба да се произведат бидејќи за висок обем на производство се потребни калапи со висок квалитет. Трошоците за произведен дел може да се минимизираат со избирање на соодветна конструкција на калапот и прилагодување на продуктивноста според достапната опрема. Трошоците за произведен дел исто така зависат и од квалитетот кој се бара, во однос на квалификацијата на работната рака и слично [17, 31, 33].

Делумна механизација на процесот на рачно полагање е постигната со примена на процесот на распрскување, кој се разликува од рачното положување според начинот на поставување на матрицата и зајакнувачот. Исечканите влакна се распрскуваат во калапот истовремено со матрицата со примена на специјален пиштол за распрскување. Процесот на распрскување е стар процес кој најчесто се користи за производство на делови со константна дебелина: делови од камиони, мали бродови и делови за автомобили. Со оглед на фактот што операторот целосно го контролира нанесувањето на смолата и влакната во калапот, квалитетот на производот целосно зависи од вештините на операторот. Ова придонесува за добивање на производи со различни физички својства, квалитет и изразена неуниформност. Направен е обид за комплетна автоматизација на процесот на рачно положување и тие процеси сеуште се истражуваат и се многу скапи поради високите трошоци за потребната опрема и алати. Затоа, примената на автоматизацијата во овие процеси би била оправдана само доколку се работи за добивање на високо квалитетни и одговорни композитни структури.

2.3.2. Полагање на препрег

Препрег е преимпрегниран материјал зајакнат со влакна каде смолата е делумно вмрежена или вцрстена. Влакната може да бидат во форма на унидирекционална лента, ткаенина или листови од случајно ориентирани влакна (сечкани) (Слика 2.5). Основната разлика помеѓу положувањето на препрег и конвенционалното рачно положување е во

тоа што при примената на препрег импрегнацијата на влакната е извршена пред да се полагаат [15, 17,18]. Повеќето препрези се изработени од терморепактивна матрица и како зајакнувачи вообичаено примена наоѓаат стаклените, јаглородните и арамидните влакна. Овие препрези се добиени со користење на методот на топла импрегнација (hot melt) со топење кое ја минимизира содржината на испарливи компоненти присутни во препрегот. Бидејќи смолата е делумно вмрежена, препрезите имаат ограничен рок на траење кој може да се зголеми со нивно чување во ладилници. Кај повеќето препрези содржината на смола е повисока отколку што е пожелно во финалниот дел. Отстранувањето на вишокот на смола и испарливи компоненти е важно затоа што може да резултира со појава на пори во финалниот дел доколку не се отстранат. Ова е неопходно бидејќи за секој 1 % на пори настанува намалување на внатрешната сила на смолкнување за 7 %, а значително намалување на јачината на компресија се случува при содржина на пори над 2 % [17]. Од друга страна, помалата содржина на смола придонесува за намалување на тежината и цената без да се влијае на јакоста. Препрезите вообичаено се набавуваат во ролни со конвенционална ширина (30 - 60 cm). Тие вообичаено се сечат за да се прилагодат на калапот и се полагаат слој по слој се додека не се постигне посакуваната дебелина. Вообичаено автоклав или вакуум е потребно за консолидирање и вмрежување на деловите ламинирани со препрег [31- 33]. Некои од предностите и недостатоците на примената на препрезите се дадени во табела 2.6.



Слика 2.5. Различни видови на препрег материјали [15, 17]

Табела 2.6. Предности и недостатоци од примената на препрег материјали [32].

Предности	Недостатоци
Висок волуменски удел на влакната	Потребно е подолго време и вложување на поголем труд
Униформна дистрибуција на влакната	Поскапа опрема за вмрежување
Едноставно производство	Дополнителни трошоци за изработка на препрег

Достапни се и препрег материјали со термопластична полимерна матрица со поголем број на влакна во различни форми. При нивната примена, потребно е да се загрееат за да може да се обликуваат бидејќи тие вообичаено се крути на собна температура. Процесирањето на термопластичните смоли се разликува од процесирањето на терморективните смоли. При процесирањето на термопластичните смоли вообичаено се потребни поголеми температури и притисоци поради вискозноста на смолата која треба да се намали со загревање за време на процесот. Потоа, вмрежувањето е заменето со едноставно ладење на собна температура. Препрег материјалите наоѓаат широка примена за изработка на авионски делови со комплексна геометрија, производство на ветерници, делови за автомобили, спортска опрема, цевки за експлоатација на гас и нафта и производство на садови под притисок [29].

2.3.3. Компресионо пресување

Процесот на компресионо пресување претставува една од поважните технологии за добивање полимерни композитни материјали. При овој процес се користи соодветен алат кој ја исполнува функцијата на калап. Дополнително се користи хидраулична преса со загревање на алатот и релативно висок притисок за вмрежување на влакната и смолата во калапот.

Процесот на компресионо пресување е широко применет процес. Ги минимизира трошоците за подготовка на деловите, речиси го елиминира отпадот од материјал, ја редуцира секундарната доработка и бара вложување на минимален труд. Процесот лесно може да се автоматизира, овозможувајќи висока продуктивност со многу добра униформност и квалитет на произведените делови [17, 32].

3. ПЛАНИРАЊЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТИ

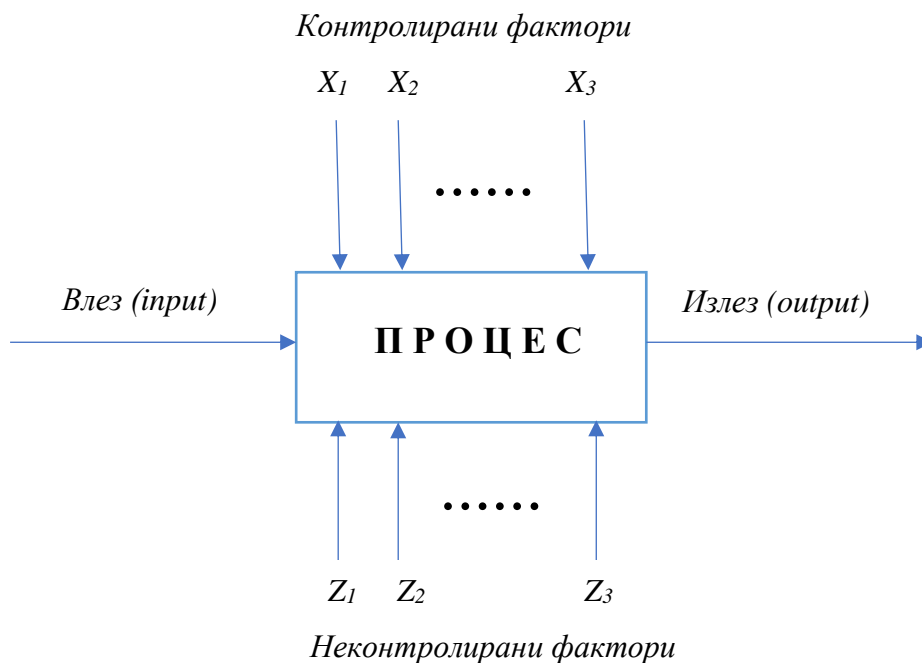
3.1. Стратегија на експериментирањето

Набљудувањето на некој систем или процес е важен дел од процесот на стекнување знаења и е интегрален дел на учењето и разбирањето како системите и процесите функционираат. Меѓутоа, за да се сфати што се случува со процесот ако се променат некои влезни фактори не е доволно само да се набљудува – потребно е да се менуваат влијателните големини. Ова значи дека за навистина да се разбере релацијата *причина-последица* на некој систем, треба наменски да се менуваат влезните варијабли во системот и да се набљудуваат промените на излезот на системот, кои што тие варијабли ги предизвикуваат. Со други зборови, потребно е да се извршат експерименти врз системот. Набљудувањето на системот или процесот води кон теории и хипотези за тоа што го прави системот да функционира, но за да се покаже дали тие теории се точни, потребни се и експерименти [10, 38, 39].

Генералниот модел на систем или процес е прикажан на сликата 3.1. Обично го замислуваме процесот како комбинација на операции, машини, методи, луѓе и други елементи кои трансформираат некаков влез (често материјал) во излез кој има една или повеќе видливи одзивни варијабли (y). Некои од процесните варијабли и особини на материјалите $x_1, x_2, \dots, \dots, x_p$ се контролибилни, додека други $z_1, z_2, \dots, \dots, z_q$ се неконтролибилни.

Експериментите често вклучуваат неколку фактори. Обично, цел на експериментаторот е да го утврди влијанието што го имаат факторите врз одзивот на системот. Општиот пристап кон планирањето и изведувањето на експериментите се нарекува стратегија на експериментирањето. Еден експериментатор може да употреби неколку стратегии [11]. Некои од тие стратегиите се следниве:

- Стратегија на проба - грешка,
- Стратегија на еден-по-еден-фактор,
- Факторна стратегија.



Слика 3.1. Генерален модел за систем или процес [10]

Стратегија на проба – грешка. Оваа стратегија на експериментирање е врз основа на пристапот *проба - грешка*. Често во пракса ја користат научниците и инженерите. Експериментаторите што ја користат оваа стратегија имаат големо техничко и теоретско познавање за системот што го проучуваат како и добро практично искуство. Користејќи го своето знаење експериментаторите избираат т.е. претпоставуваат кој е најдобриот сет на фактори за даден процес/систем. Врз база на резултатите од еден тест со менување на еден/повеќе фактори се прави следниот и сите понатамошни експерименти. Оваа стратегија има, најмалку, два недостатоци. *Прво*, ако првиот тест не дава задоволителни резултати, експериментаторот треба да направи друго предвидување со променето ниво на факторите. Ова може да трае долго време без било каква гаранција за успех. *Второ*, ако првото предвидување дава резултат експериментаторот го прекинува тестирањето иако нема гаранција дека го нашол најдоброто решение.

Стратегија на еден по еден фактор. Овој пристапот се состои од избор на стартна точка или базна линија на нивото на секој од факторите, и потоа сукцесивно се менува нивото на секој фактор во рамките на неговиот опсег, додека останатите фактори се држат константни на ниво од базната линија. По изведувањето на сите тестови, најчесто, се конструираат серија на графици кои покажуваат како варијаблата на одзивот се менува со промената на секој фактор поединечно додека другите фактори се држат

константни. Главен недостаток на овој пристап е што не ја зема во обзир интеракцијата. *Интеракцијата* претставува ефект кој се манифестира со тоа што еден фактор не врши еднакво влијание врз одзивот при различно ниво на друг фактор. Интеракцијата меѓу факторите е многу честа и доколку ја има, стратегијата на еден по еден фактор ќе продуцира лоши резултати. Овој пристап кај експериментирањето многу често се применува во практиката. Еден по еден фактор експериментите секогаш се помалку ефикасни од останатите методи базирани на статистички пристап кон планирањето на експериментите.

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

3.2. Основни принципи на експериментирање

Под *статистички планирање на експерименти* се подразбира процес на планирање на експериментот така што соодветните податоци ќе бидат собрани и анализирани со статистички методи што ќе резултира во валидни и објективни заклучоци.

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

Трите основни принципи на планирањето на експериментите се: рандомизација, репликација и распоредување по блокови [10, 11, 38, 39].

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

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

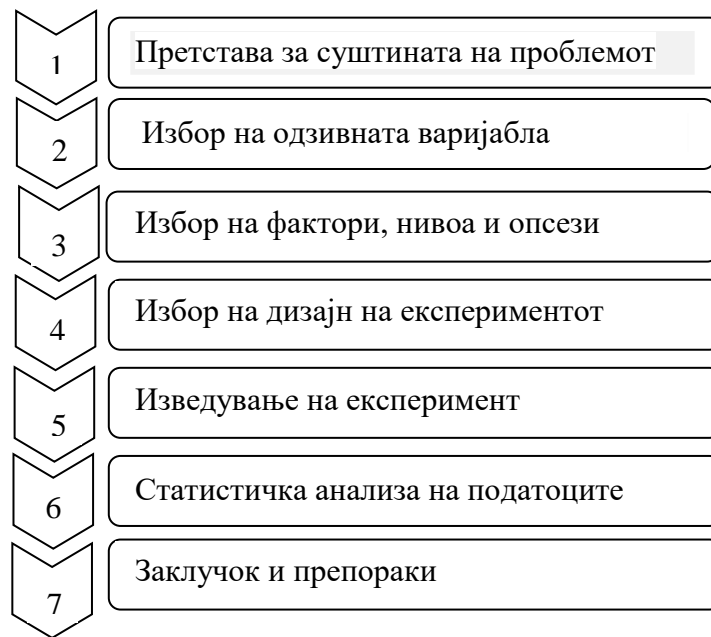
Компјутерските софтверски програми нашироко се користат при изведувањето на планираните експерименти. Овие програми често го презентираат изведувањето на опитите по случаен редослед.

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

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

3.3. Постапка при планирање на експерименти

За да се употреби статистичкиот пристап кон планирање 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 анализираат [38]. На сликата 3.2 даден е концизен преглед на постапката за планирање на експерименти. Проектирањето на експериментот вклучува одлука за големината на примерокот (број на реплики), избор на погоден редослед на опитите за експерименталните проби, и утврдување дали има ограничување во процесот на рандомизација и исклучување на факторите кои не се од примарна вредност.



Слика 3.2. Постапка за планирање на експерименти

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 [38, 39]. Во многу случаи се прифаќа за соодветен полином од понизок ред. Моделот од прв ред со две варијабли е [11]:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad (3.1)$$

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

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (3.2)$$

каде членот $x_1 x_2$ ја претставува интеракцијата на два фактори. Бидејќи интеракцијата на факторите е релативно честа, овој моделот од прв ред со интеракција широко се користи. Ако е неопходно интеракција од повисок ред исто така може да биде вклучена

кај експериментите со повеќе од два фактори. Друг широко користен модел е моделот од втор ред:

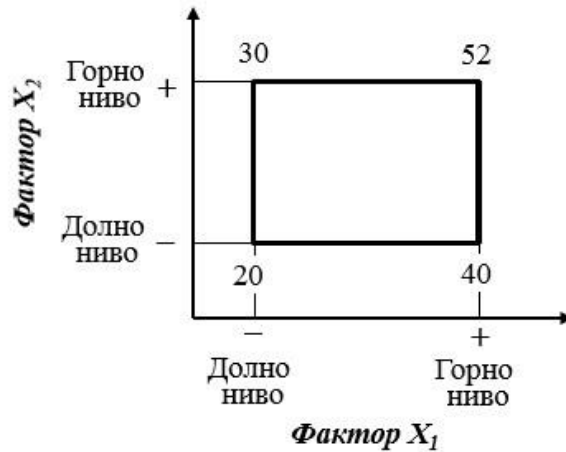
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \varepsilon \quad (3.3)$$

Статистички методи треба да помогнат анализата на податоците и заклучоците да бидат објективни. Ако експериментот е добро дизајниран и изведен според планот, статистичките методи нема да биде тешко да се применат. Постојат многу одлични софтверски пакети наменети за анализа на податоци [9-11]. Често пати и едноставните графички методи играат значајна улога за анализа и интерпретација на податоците. Исто така, многу е корисно да се презентираат резултатите од експериментите во вид на емпириски модел т.е. во вид на равенка која ја изразува поврзаноста меѓу одзивот и важните дизајн фактори. Треба да се има во предвид дека статистичките методи не можат да потврдат дали некој фактор (фактори) има одреден ефект. Тие само претставуваат водич за доверливоста и валидноста на резултатите [9-11, 39].

Штом податоците ќе бидат анализирани, експериментаторот треба да извлече практични заклучоци за резултатите и да препорача соодветна акција. Графичките методи се често корисни во оваа фаза, особено, за да им се презентираат резултатите на други лица..

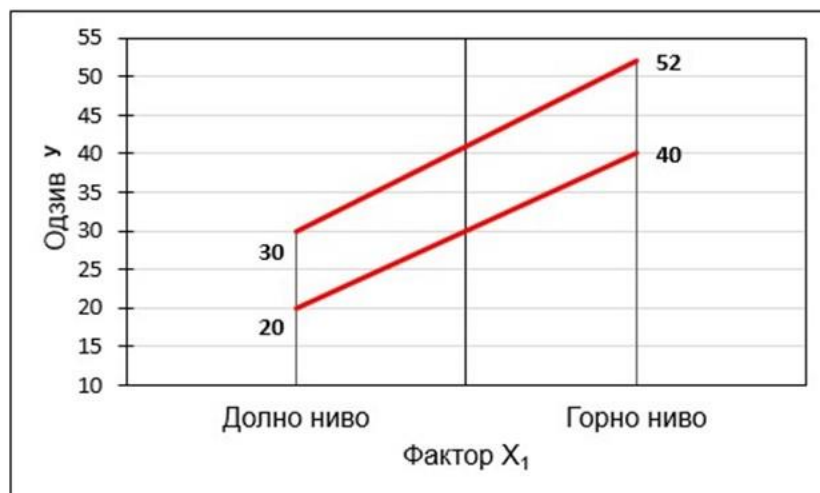
3.4. Факторен дизајн на експерименти

Многу експерименти вклучуваат проучување на ефектите на два или повеќе фактори. Под факторен дизајн се подразбира избор на сите можни комбинации на фактори кои ќе се реализираат со експериментот. Елементите на факторниот дизајн ќе се разгледаат преку примерот од слика 3.3, кој претставува дво факторен експеримент со по две нивоа на факторите [11, 38, 39]. Овие нивоа се нарекуваат „долно“ и „горно“ и се означуваат со „-“ и „+“ соодветно. Во овој дво-факторен експериментален дизајн главниот ефект на факторот X_1 се разгледува како разлика на средната вредност на одзивот на долното ниво од X_1 и средната вредност на одзивот на горното ниво од X_1 . Тоа важи и за факторот X_2 .

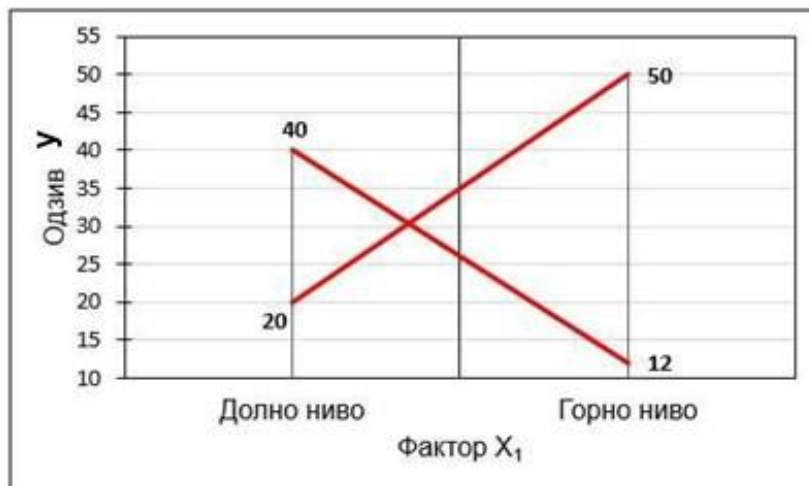


Слика 3.3. Дво-факторен експеримент со одзивот (y) прикажан во ќошевите [11]

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



Слика 3.4. Дво-факторен експеримент без интеракција



Слика 3.5. Дво-факторен експеримент со интеракција

ГЛАВА 4: АВТОМАТИЗАЦИЈА НА ПРОЦЕСИТЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВО НА ДЕЛОВИ ОД КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ

4. АВТОМАТИЗАЦИЈА НА ПРОЦЕСИТЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВО НА ДЕЛОВИ ОД КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ

4.1. Автоматизирано полагање на влакна/ленти

Роботизираниите процеси за автоматизирано полагање на влакна/ленти се користат за производство на композитни ламинати со врвни карактеристики од унисидирекционални препрег материјали. Автоматизираното полагање на влакна (Automate Fiber Placement technology - AFP) и автоматизираното полагање на ленти (Automate Tape Laying technology - ATL) се две главни технологии што денес се користат за производство на делови од композитни материјали.

Термините *fiber placement*, *tape placement* и *tape laying*, генерално сите се однесуваат на ист или тесно поврзан производен процес со полагање на влакна или полагање на ленти. Разликата меѓу *laying* и *placement* се однесува на сложеноста на геометријата на полагање. Првиот термин се употребува за да го опише процесот на полагање на поширок препрег на главно рамна површина, додека вториот термин се однесува на полагање на група на повеќе тесни препрег ленти на посложени површини. Аналогно на тоа, производниот процес со автоматизирано полагање на тенки ленти препрег со точна широчина до 12,7 mm или со користење на единечни влакна или повеќе влакна кои формираат тесни ленти (*tow*) со ширина од 3,175 mm, 6,35 mm или 12,7 mm (0,125 inch, 0,250 inch или 0,50 inch) е познат како AFP технологија [40, 41]. Со AFP технологијата можат влакната да се полагаат во различни ориентации. AFP машините обично се снабдени со глава која може да носи до 32 шпулни со материјалот кој се полага. За време на процесот, секоја препрег лента се влече од посебна шпулна која е сместена во систем за затегнување. Потоа, преку транспортен систем се влече секоја индивидуална лента кон главата за полагање. На крајот од главата, преку која се полага композитниот материјал, секоја индивидуална лента се групира во излезна широка лента т.н курс, чија ширина може да варира во текот на процесот. За време на полагањето секоја индивидуална препрег лента се движи со одредена брзина, што овозможува лентата

слободно да се полага врз површината со комплексна форма. Производниот процес со автоматизирано полагање на пошироки унидирекционални ленти препрег и тоа со ширина од 76,2 mm до 304,80 mm (3 inch до 12 inch) е познат како ATL технологија [42, 43]. За двата процеси, термопластичните влакна/ленти кои се полагаат потребно е да се загреат, а како извор на топлина може да биде инфрацрвен грејач, топол воздух или ласер. На тој начин, преку нивно загревање, доаѓа до слепување на слоевите кои се полагаат, а за да се постигне консолидација се применува компакционо валјаче. Во оваа постапка најчесто се користи робот за полагање на лентите по претходно дефинирани патеки, што овозможува висок степен на слобода при дизајнирање на финалниот производ. Процесот на автоматизирано полагање на ленти се состои од автоматизирано полагање, односно редување на препрег слоеви еден над друг на рамен или со сложена форма алат, кој се нарекува мандрел. Словите препрег се поврзуваат со примена на топлина и притисок. Важно е при оваа постапка да се овозможи лентите да се консолидираат директно за време на поставувањето, што ќе спречи да се троши дополнително време и енергија за пост-консолидација [44, 45].

Истражувањата кои се направени за примена на робот во автоматизацијата на процесите за производство на композитни производи се со цел подобрување на постоечките процеси на производство. Најголемиот дел од истражувањата за автоматизирано производство се ориентирани кон примена на термопластични препрег материјали иако денес се во употреба многу одговорни и носечки композитни делови добиени со термореактиви материјали [46]. Причина за ваквите истражувања е тоа што при процесирање на термопластичен препрег, материјалот може да се соединува на самото место директно за време на полагањето. Меѓутоа, при процесирање на термопластичен препрег исто како кога се процесира и термореактивен препрег се појавуваат многу предизвикувачки проблеми како што се: појава на празнини (gap) и преклопувања (overlap) меѓу лентите, што влијае врз крајните карактеристики на материјалот, што бара продлабочено истражување. Од истражувањата што се прават за примена на роботизирани процеси за автоматско полагање на влакна/ленти се очекува да се обезбеди подобро добивање на високо квалитетни структури од композитни материјали со нов процес т.н консолидација на самото место (*in situ*) [47-50].

Технологиите на автоматизирано полагање на влакна (AFP) и ленти (ATL) се понови технолошки процеси кои сеуште се развиваат и подобруваат. Развојот на овие автоматизирани постапки влијае врз развојот на авионската, воената и автомобилската

индустрија, но и врз развојот на современите индустрии како што се индустриите за производство на алтернативни извори на енергија, а тука пред сè индустријата за производство на ветерници. Развојот во технологијата е во тоа што рачното полагање, намотување и сл. сега е заменето со целосно автоматизирано производство на композитни делови [50, 51].

Предностите и придобивките од примената на овие постапки за автоматизирано полагање на влакна/ленти за добивање на делови од композитни материјали се следните [45]:

- *Поголема продуктивност во производството* - што подразбира дека автоматизацијата го забрзува процесот на производство, а притоа се постигнува подобар квалитетот на самиот производ, што ја прави продуктивноста во производството повеќекратно поголема.

- *Подобар квалитет на композитот* - за што клучен фактор е компактното поврзување на слоевите. Тука мора да се напомене дека квалитетот кој се постигнува кај композитните структури е континуиран, што е тешко остварливо при производство на композити без автоматизиран процес.

- *Помалку неискористен отпаден материјал* - што директно влијае на цената на производството на композитната структура која може да се произведе оптимално со максимално искористување на потребниот материјалот.

- *Помал труд* - бидејќи процесот е целосно автоматизиран, единствениот човечки фактор кој влијае на производството се операторите на машините/роботите.

- *Помало време на производство* - автоматизацијата е иднината во индустријализацијата на општествата кои се стремат да го намалат човечкиот удел во производството. Автоматизираното производство е неспоредливо побрзо во споредба со производството без роботизирани машини.

- *Намалени квалификации на стручниот кадар за производство* - што подразбира дека се потребни пониски квалификации за доминантниот дел од работниците. Потребно е повеќе знаење за програмерите и операторите на автоматизираните машини.

- *Точност и повторливост на производот* – тоа е една од најглавните предности во автоматизацијата на производството која овозможува речиси идентичност во производството на сериски производи.

· *Софтверски решенија* - со кои се дозволува брзо програмирање на сложени форми и генерирање на машински патеки за соодветните дизајнирани слоеви од композитот.

Според Crosky et al. [47] постојат четири машински конфигурации за автоматизирано полагање на влакна или ленти од композитни материјали:

- Конфигурација за намотување – најстара конфигурација и најраспространета – позната како filament winding (FW), подразбира автоматско намотување на влакна и може да се користи само за ротациони форми.

- Конфигурација на подвижен столб – машинска конфигурација кај која AFP/ATL главата е поставена хоризонтално во основна положба и се придвижува вертикално по столб.

- Гантри конфигурација – машинска конфигурација кај која AFP/ATL главата е поставена вертикално во основна положба и се движи преку носечка мост-конструкција во гантри изведба и

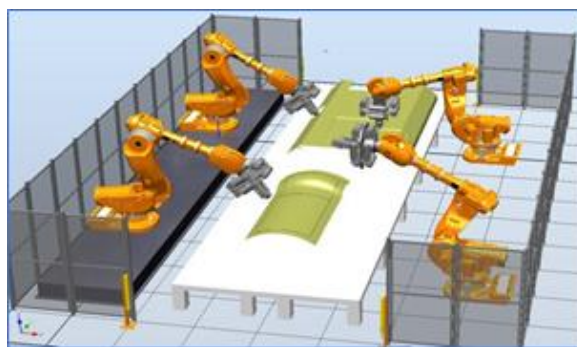
- Конфигурација со роботска рака – AFP/ATL главата е поставена како алат на стандарден индустриски робот, најчесто робот од типот 6R роботска рака. Дополнително, ваквиот робот може да се постави на линеарна оска со цел да се зголеми работниот простор на конфигурацијата. Оваа конфигурација е со поголем број на степени на слобода, што овозможува поголем опсег на геометриски форми што може да се постигнат при полагањето на препрег лентите. Меѓутоа, управувањето со движењето е покомплексно, а точноста е клучно прашање при примената во композитната индустрија. Со оглед на тоа што ваквиот систем има помала цена на чинење во споредба со други машински конфигурации, примената на ваквите конфигурации е значително зголемена.

Четвртата конфигурација се користи за истражувањата во оваа докторска дисертација. Сите анализи и експерименти се направени со примена на роботизирана автоматска машина.

Способноста за автоматско изработување на несиметрични делови од композитни материјали го прави AFP процесот водечка технологија за добивање на високо перформансни делови од композитни материјали. Главни производители на AFP системи се: Automated Dynamics (USA), Accudyne (USA), MAGCincinnati (USA), Coriolis (Франција), Electroimpact (USA), Foster Miller/ATK (USA), Ingersoll (USA), Mikrosam (Северна Македонија) и MТorres (Шпанија) [1, 2, 5].



а)



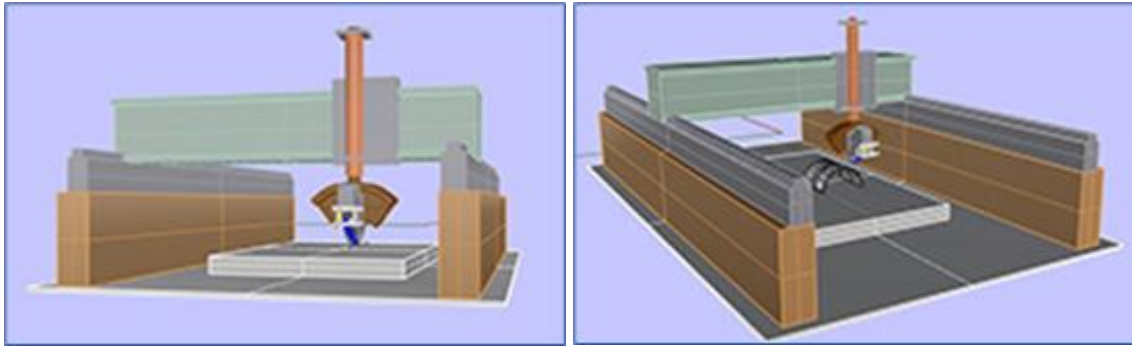
б)

Слика 4.1. а) AFP гантри машина – Микросам; б) AFP роботска (со повеќе работи) – Микросам [48]

ATL процесот во денешно време добива се поголем интерес поради високата продуктивност која може да ја постигне при производство на рамни ламинати. ATL системите се користат за производство на голем број делови, како што се опашки на авиони, крилата на авионите и слично. Главни производители на ATL опрема се: MAGCincinnati (USA), MTorres (Шпанија) и Forest Line (Франција). GFM (Германија), Mikrosam (Северна Македонија), Entec (USA) и ATK (USA) [2, 5].



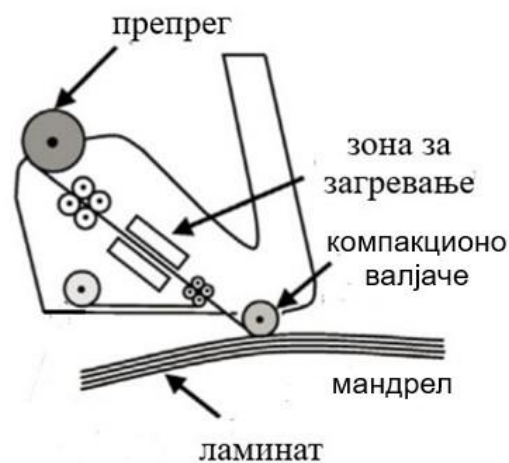
а)



б)

Слика 4.2. а) ATL машина – Микросам; б) Автоматско полагање на ленти на рамна површина и на закривена контура – Микросам [48]

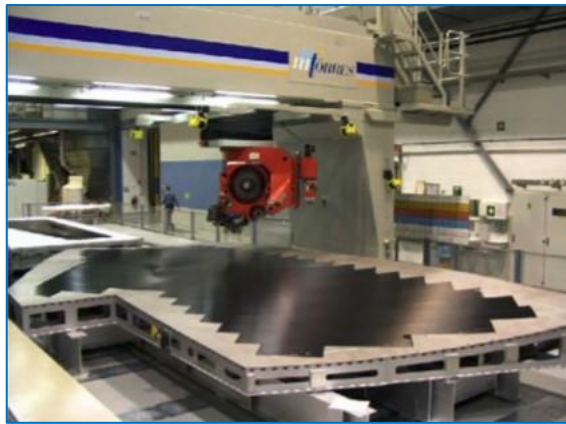
Поголемиот број комерцијално достапни системи го чуваат препрегот директно во главата за полагање, како што е прикажано шематски на слика 4.3. според Astrom [51].



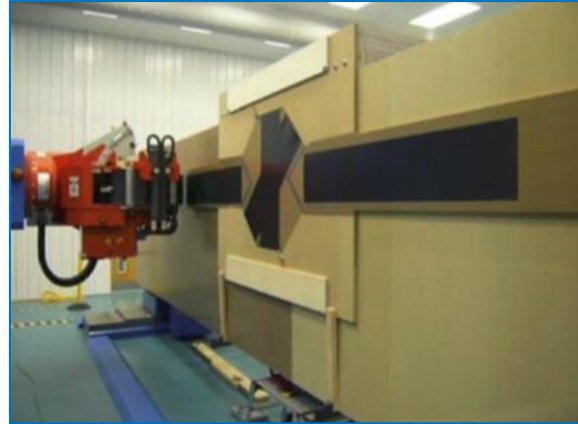
Слика 4.3. Шематски приказ на глава за полагање ленти кај ATL систем според Astrom [51]

Примери на конструктивни решенија на ATL системи се дадени на слика 4.4.

ATL (и AFP) може да се толкуваат како форма на производство на дополнителна (адитивна) технологија, поради тоа што делот кој се произведува се прави со додавање на материјал, наспроти отстранување на материјал за време на машинската обработка [41].



а)



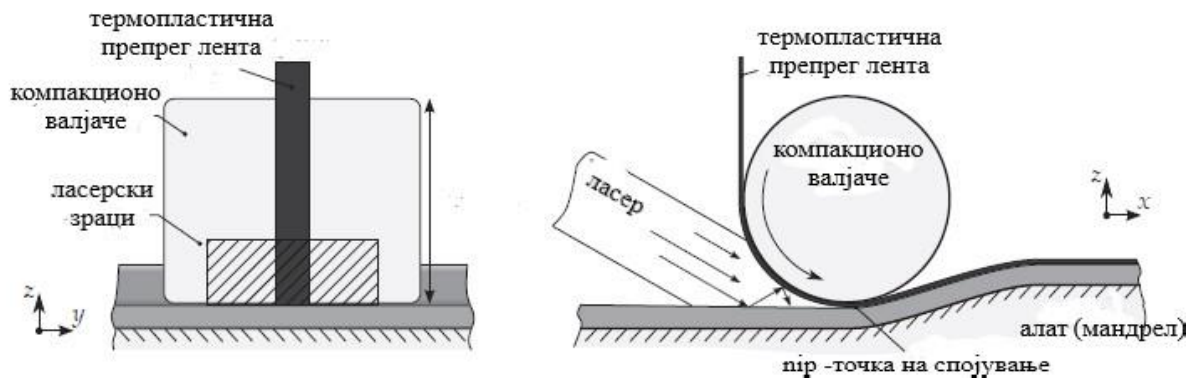
б)

Слика 4.4. Пример за ATL системите монтирани на а) хоризонтален портал и б) вертикален столб [50]

4.2. Роботизирани процеси за автоматизирано полагање на термопластични влакна/ленти (AFP/ATL) со примена на ласер

Роботизираниот процес за автоматизирано полагање на композитни влакна/ленти е комплексен систем од елементи кој овозможува примена на различни брзини на полагање, симултано температурно процесирање, употреба на притисок за консолидација на препрегот на површината врз која се полага, опции за контрола на индивидуалното движење и засебно независно затегнување на секоја препрег лента.

На слика 4.5 шематски е претставен основниот концепт на процесот на автоматизирано полагање на термопластична лента со примена на ласер (Laser Assisted Automation Tape (placement) Laying – LAT(P)L). Се состои од автоматско полагање на препрег ленти кои формираат слоеви кои се редат еден над друг, а се поврзуваат и консолидираат на самото место со примена на ласер и компакционо валјаче. Главата на којашто се наоѓаат овие компоненти е прицврстена за робот кој ги поставува лентите по претходно дефинирани патеки [3, 52, 53].



Слика 4.5. Шематски приказ на процесот за автоматско полагање на лента AFP/ATL со помош на лазер (лево: преден поглед, десно: страничен поглед) [53]

Концептот на *in situ* консолидација е едноставен. Влезната термопластична препрег лента во контакт со подлогата односно мандрелот под доволен притисок и температура над точката на топење се консолидира и кристализира при ладење со контролирана или неконтролирана брзина [52 - 55].

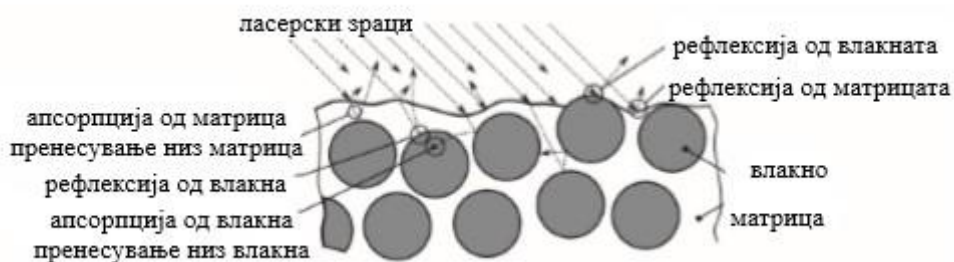
Примената на лазерското греење има некои предности во однос на алтернативните извори на топлина, како што е топлиот гас. Во процесот на греење со топол гас (Hot Gas Torch -HGT), термичкиот флукс тешко може да се контролира, додека во процесот со лазерско греење, лазерските зраци се контролираат просторно и временски. Затоа, добиените делови од композитни материјали со автоматизирани процеси со примена на лазер се очекува да се со по униформен квалитет, споредено со оние добиени со HGT процес [56, 57]. Две најважни предности од примената на лазерско греење се високата енергетска густина (акумулирана енергија во единица систем за единица волумен [J/m^3]) и краткото време на одговор. Првото овозможува примена на поголема брзина при полагањето на лентите, додека второто овозможува полагање на лентите на комплицирани геометрии, вклучувајќи големи варијации во брзината на полагање. Сепак, примената на лазер, исто така, има свои недостатоци. Трошоците за опремата се високи во споредба со конвенционалните извори на топлина, а исто така, лазерот секогаш бара опремата да биде сместена во заштитено опкружување. Дополнително, примената на лазерско греење бара темелно разбирање на интеракцијата на светлината со термопластичните ленти зајакнати со влакна (препреси) [5, 7].

Кога зракот од лазерот е поставен кон композитниот препрег, дел од почетниот интензитет (I_0) ќе биде рефлектиран (I_r), дел апсорбиран (I_a), а дел пренесен (I_t).

Количеството на зрак коешто е рефлектирано, апсорбирано или пренесено зависи од голем број на фактори како што се карактеристиките на материјалот односно препрегот, брановата должина на зракот и дистрибуцијата на влакната [4].

На сликата 4.6 е прикажан оптички феномен којшто настанува кога зракот од ласерот го погодува композитниот материјал. Во идеален случај, површината на лентата зајакната со влакна е покриена со тенок и идеално рамен слој од термопластична матрица којшто го помага спојувањето. Но, во пракса ваков слој ретко постои. Ласерскиот зрак може да се рефлектира од термопластичната матрица и исто така од влакната кои се на површината на лентата.

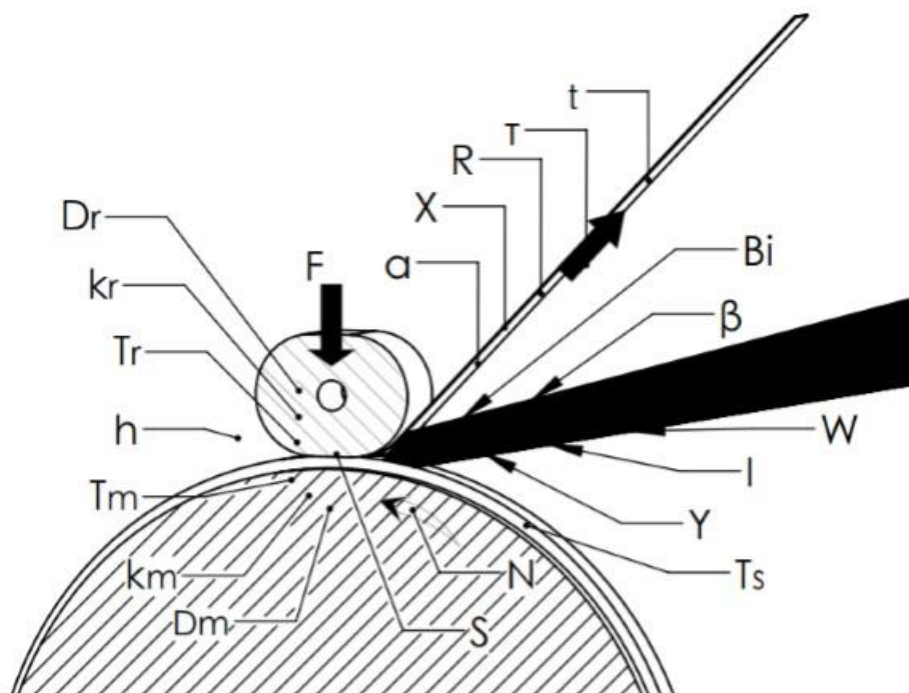
Дел од зракот кој е рефлектиран од површина треба да биде што е можно помал за загревањето со ласер да биде ефективно. Секој зрак кој не е рефлектиран, е пренесен или апсорбиран од матрицата и од влакната. Тоа е всушност апсорпцијата на зрак која го помага загревањето на материјалот. Повеќето термопласти се транспарентни т.е. немаат способност за апсорпција на зрак со бранова должина од 400 до 1600 nm и затоа загревањето со ласер кој има бранова должина во тој ранг не е ефективно. Тоа најчесто се решава со додавање на јаглероден полнител кој го апсорбира ласерскиот зрак и е независен од неговата бранова должина така што оптичката транспарентност на термопластиката се намалува до 0. Јаглеродните влакна ја имаат истата улога. Ласерската бранова должина и материјалите мора да бидат одбрани прецизно за да се постигне ефективно загревање [4].



Слика 4.6. Шематски приказ на оптички феномен којшто настанува кога зракот го погодува термопластичниот композит [58]

Генерално, ATL/AFP процесот со примена на ласер за загревање, вклучува многу параметри кои влијаат на резултатите од процесот. За да се добијат квалитетни делови,

комбиниран ефект на главните параметри на процесот мора да се проучува и анализира. Во табела 4.1 и на слика 4.7 дадени се факторите кои влијаат на излезот од автоматизираниот процес на полагање на влакна/лента со примена на ласер за загревање. Поврзувањето на семикристални термопластични ленти со LATL процес е анализирано во многу литератури [57, 58]. Многу истражувања се направени во насока на определување на дистрибуцијата на температурата во близина на зоната на поврзување со цел да се определи оптималниот агол на паѓање на ласерските зраци за постигнување на добар интерфејс меѓу слоевите [53 - 56]. Последните истражувања покажуваат дека со автоматизиран процес за полагање термопластична препрег ленти со брзина дури и поголема од 400 mm/s се добиваат композитни рамни плочи со блиски својства на својствата на добиените рамни плочи кога истите се консолидираат во автоклав [55 - 59].



Слика 4.7. Фактори кои влијаат на автоматизирани процес на полагање со примена на ласер за загревање [52]

Табела 4.1. Список на фактори кои влијаат на излезот од автоматизиранiot процес на полагање со примена на ласер за загревање

<i>Параметри кои влијаат на резултатот од процесот</i>	
F - Сила на притисок на валјаче	Y - Профил на зракот
S - Површина на притискање на валјачето	W - Големина и форма на зракот
D _r - Дијаметар на валјачето	I - Интензитет на зрак
k _r - Топлотна спроводливост на валјачето	β - Агол на зрак
T _r – Температура на местото на интерфејс на валјачето	B _i - Позиција на самото место (Spot position bias)
h - Коефициент на пренесување на топлина	α - Влезен агол во лента
T _s - Температура на подлогата	τ - Тензија на лентата
T _M - Температура на мандрелот	X - Квалитет на импрегнација на лентата
k _M - Топлотна спроводливост на мандрелот	R - Рапавост на површината на лентата
D _M - Кривина на мандрелот	t _{tape} - Дебелина на лента
N - Брзина на полагање	

Во истражувањата од оваа докторска дисертација, дел од овие фактори се земени за константи, а дел како променливи параметри. Изборот на променливите параметри за истражувањата во рамките на оваа докторската дисертација и анализа за нивното влијание врз автоматизираните ATL/AFP процеси при полагање на термопластична лента е дадено во глава 6.

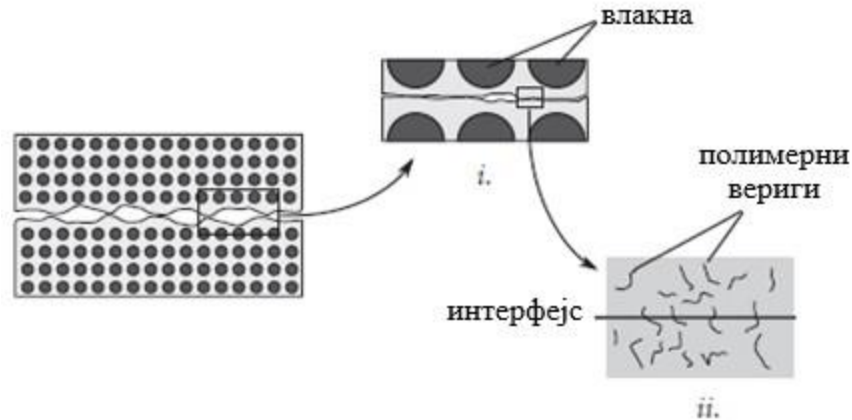
4.2.1. Процесирање на термопластичен препрег материјал со ATL/AFP

Многу важен процесен параметар претставува материјалот кој се користи во ATL/AFP процесите. Производниот процес за добивање на композити од термопластични материјали главно зависи од вискозитетот на смолата и поради тоа импрегнацијата е многу важна при процесирање на термопластични материјали [60]. Карактеристиките на термопластичните препрег ленти определени преку содржина на пори, волуменски удел на влакна, степен на натопување на влакната, униформност, површинска рапавост и др. го одредуваат потенцијалот на процесот.

Меѓу првите развиени термопластични матрици за добивање на композити со високи карактеристики се полиетерсулфон PES и полиетеримид PEI. Подоцна се развиени високо перформансните семикристални термопластични матрици како што се: поли етер етер кетон ПЕЕК, полиетер кетон кетон РЕКК и полифенилен сулфид PPS и истите имаат

широка примена во авионската индустрија [59]. PEEK покажува релативно поголема јакост на кршење, повисока температура на примена и е помалку склон кон хемиски реакции во споредба со аморфните полимери. Сепак, поради повисоката T_g и вискозност, обработката на PEEK бара примена на повисока температура и притисок. Моментално, PEEK заедно со PPS се многу популарни материјали што се користат во AFP/ATL процесите додека PEEK се користи поретко [53, 60, 61]. Во однос на препрег лентите кои се користат за AFP/ATL процесите, често се применуваат APC-2 CYTEC PEEK термопластичната смола и AS4 јаглородните влакна. Други препрег ленти кои може да се сретнат во литературата се: Hexcel HexTow IM6 / PEEK, IM7 / PEEK; TenCate Cetex AS4 / PEEK и од неодамна CF / PEEK ленти од Supreme и Tejlin (Toho Tenax) [62, 63]. Унидирекционалните ленти што често се користат се со ширина од 6,35 mm ($\frac{1}{4}$ inch) до 51 mm (2,0 inch) и дебелина од 0,13 mm (0,005 inch).

Lee и Springer во своите истражувања [64] презентирале модел за производство на композити од термопластични препрег ленти врз основа на PEEK и јаглородни влакна со примена на AFP/ATL. Тие констатираат дека процесот дека се состои од три главни чекори: импрегнација, консолидација и кристалност [64]. Импрегнацијата е параметар кој не може да се контролира при автоматското полагање на влакна/ленти додека консолидацијата и кристалноста може да бидат контролирани. Консолидацијата се состои од два под процеси: интимен контакт и автохезија односно директно поврзување или само поврзување (autohesion, healing). Автохезија е формирање на врски помеѓу две површини на идентичен полимер при покачена температура обично малку над T_g . Тоа е нова техника за прецизно спојување со само поврзување на полимери без потреба од лепила. За постигнување на подобри крајни карактеристики на термопластичниот композит потребно е да се постигне добар степен на интимен контакт и добро само поврзување. Интерламинарното поврзување односно поврзувањето на слоевите од термопластични ленти шематски е прикажано на слика 4.8.



Слика 4.8. Интерламинарно поврзување на термопластични композити: лентите се доведуваат во контакт, по што *i.* се развива интимен контакт и *ii.* се случува интердифузија на полимерни синцири [53]

4.2.1.1. Интимен контакт меѓу слоевите препрег

Развојот на интимен контакт (intimate contact) меѓу слоевите, кој е предуслов за поврзување, се состои од изедначување на нерамнините на лентата и на ламинатот. Почетните површински нерамнини се деформираат под дејство на топлина и притисок. Времето потребно за постигнување на интимен контакт зависи од нерамнините на површините, приложениот притисок и вискозитетот на матрицата кој зависи секако од температурата. Поради температурна зависност на вискозитетот, зголемувањето на температурата го олеснува развојот на контактот. Во регионите каде што е постигнат интимен контакт, интердифузија на полимерните вериги се јавува поради случајно термичко движење. Процесот на интердифузија генерално се објаснува со подвижноста на полимерните вериги. Полимерната матрица се состои од испреплетени вериги кои имаат ограничено движење. Нивната подвижност, а со тоа и степенот на дифузија се зголемува со зголемување на температурата. Во случај на семикристални полимери, присуството на кристални подрачја може сериозно да го инхибира процесот на интердифузија. Врз основа на тоа, може да се забележи дека интерфејсот е еден од важните параметри и затоа термичките аспекти при полагањето на лентите се многу значајни. Поголем дел од истражувањата кои се направени во оваа област, се однесуваат на поврзувањето на термопластични ленти со помош на топлина која се добива преку топол гас. Многу малку истражувања се направени за полагање на термопластични ленти и нивно поврзување со ласерско греење. Кристалноста исто така влијае на механичките карактеристики на крајниот производ и зависи од термичкиот циклус и

брзината на ладење на термопластот. Во повеќето примени на AFP/ATL процеси, брзината на ладење е дури 1000 °C во минута. Делови произведени од термопластична препрег лента врз основа на РЕЕК и јаглородни влакна имаат степен на кристалност од 20% до 35% [64]. Двата под процеси: интимен контакт и автохезија се во функција од температурата, притисокот и времето на консолидација (брзината на полагање), а тоа се три најважни параметри во секој процес. При даден притисок, потребно е повисока температура и подолго време за да се постигне оптимален степен на интимен контакт и само поврзување.

Интимниот контакт се мери со употреба на степен на интимен контакт (*Dic*), термин кој прв го вовеле Lee и Springer [64]. Општата дефиниција за *Dic* е следната:

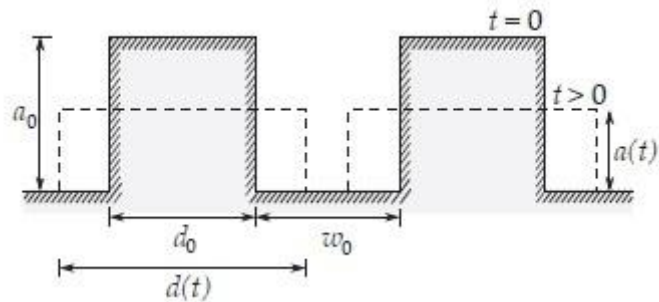
$$Dic = \frac{\text{површина на контакт}}{\text{вкупна површина}} \quad (4.1)$$

Развојот на моделот за интимен контакт во најголем дел зависи од карактеризацијата на површинската рапавост на термопластичниот препрег. Препрег лентата која Lee и Springer [64] ја користеле е врз основа на јаглородни влакна и РЕЕК и има случајни нерегуларности на површината. Бидејќи лентата е еднонасочна, соодветна е 2Д параметризација за неправилности.

Два од најпознатите модели за развој на интимни контакти се: модел на идентичен правоаголник од Lee и Springer [64], и фракталниот модел на Yang и Pitchumani [65].

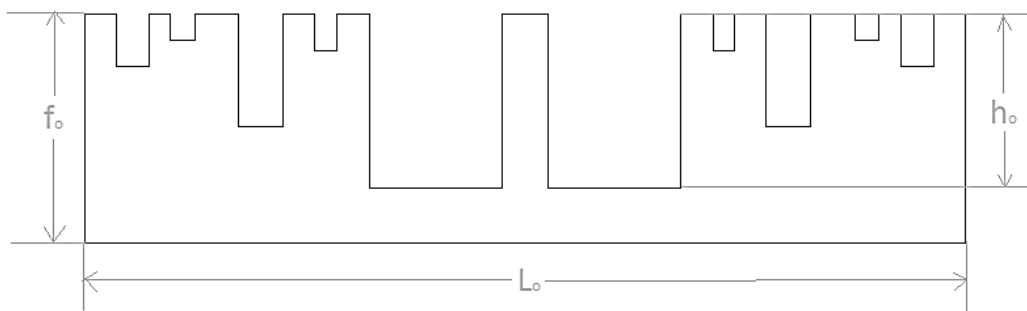
Моделот на Lee и Springer ги опишува неправилностите како дистрибуција на идентични правоаголници со иста висина и ширина на еднакво растојание како што е прикажано на Слика 4.9. Еднодимензионален Њутонов модел на проток е предложен од Lee и Springer за симулирање на ефектот на притискање на неправилностите.

Mantel и Springer [66] го прошириле моделот за неизотермни услови во кои применетиот притисок и вискозитетот се разликуваат со времето.



Слика 4.9. Модел на идентичен правоаголник на Lee и Springer и 1-Д модел на проток [64]

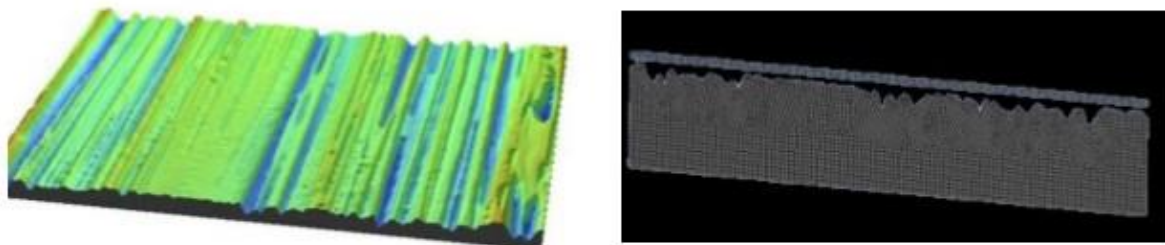
Yang и Pitchumani [65] предложиле фракционен модел за определување на површинските неправилности како поточен модел во споредба со моделот на идентичен правоаголник, претставен на слика 4.10.



Слика 4.10. Фракционен модел на површинските неправилности на Yang и Pitchumani [65]

Во нивниот модел неправилностите се претставени како дистрибуција на фракции од различни правоаголници по висина и ширина поставени на различни растојанија. Во овој модел се претпоставува дека правоаголниците од највисокиот ред се притиснати без деформација до правоаголниците од понискиот ред. Комплетен интимен контакт се постигнува ако сите нерамнини имаат иста големина односно ако сите правоаголници се притиснати до ист ред. Степенот на интимен контакт бил испитуван со употреба на моделот на конечни елементи (FEA), а како примерок била земена еднонасочна лента ACP-2/AS4 и била мерена нејзината реална рапавост на површината со примена на

профилометар. Профилот на површината е прикажан на слика 4.10. Била добиена значителна рапавост на површината на еднонасочната лента АСП-2/АС4 [65, 67].



Слика 4.11. Реална површинска рапавост на еднонасочна лента АСП-2/АС4 [67]

4.2.1.2. Автохезија - директно поврзување или самоповрзување

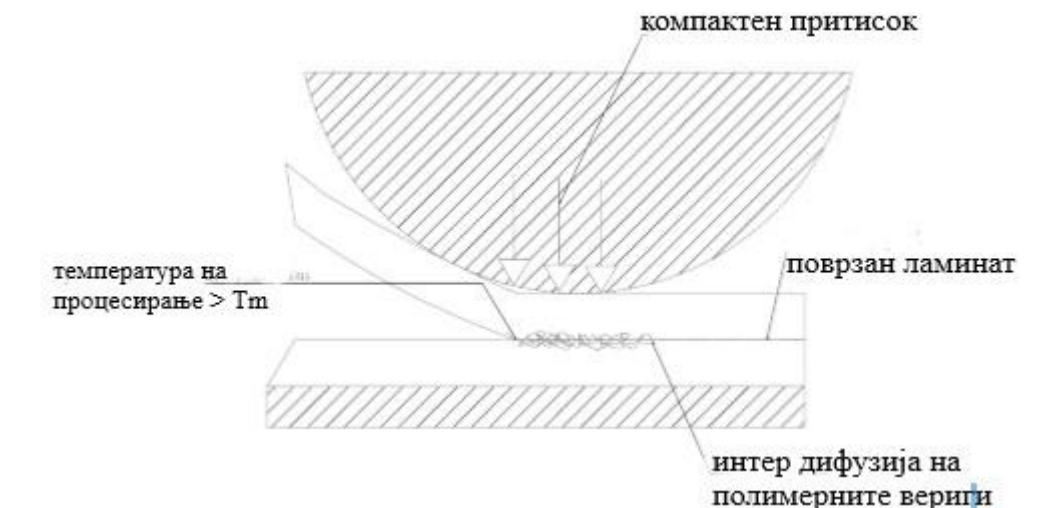
Самоповрзувањето претставува интердифузија на полимерните вериги на две површини кои дошле во интимен контакт. Кај семикристална термопластична матрица како што е РЕЕК, дифузијата на молекули низ интерфејсот се јавува при загревање на матрицата над нејзината температура на топење T_m .

Степенот на автохезија D_h се зголемува со текот на времето и се карактеризира преку јакост на врската развиена во изотермна состојба [64]:

$$D_h = \frac{S}{S_\infty} = \left(\frac{t}{t_r} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.2)$$

каде што S е јачината на врската во времето t и S_∞ е крајната јачина на врската во времето на влечење (повлекување) t_r , која зависи од температурата и е опишана со Арениусовата равенка [68].

Bastien и Gillespie [69] се обиделе да го прошират горенаведениот модел на неизотермно самоповрзување со тоа што процесот го поделиле на мали временски интервали во кои се зама изотермна фузија во просечен температурен интервал t_i и t_{i+1} . Создадената јачина на врска врз основа на теоријата на повлекување претставува збир на јачината на изотермната врска во рамките на секој интервал.



Слика 4.12. Самоповрзување на семикристална термопластична лента при процес на автоматско полагање [52]

Yang и Pitchumani [68] забележале дека теоријата на повлекување (влечење) што се користи во развојот на моделите на неизотермно самоповрзување не е валидна за големи молекуларни тежини на типични инженерски термопластики [64, 69, 70]. Оттука, предложиле да се замени времето на повлекување t_r со време на заварување t_w во горната равенка што би се однесувало на ниски или високи молекуларни тежини:

$$D_h = \frac{s}{s_\infty} = \left(\frac{t}{t_w}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.3)$$

каде времето за заварување (поврзување) во зависност од температурата дефинирано од Khan et al. [71] е како што следува:

$$t_w(T) = 2 \cdot 10^{-5} e^{43000/RT} \quad (4.4)$$

каде што R е универзална гасна константа.

4.2.1.3. Поврзување

При процесирање на термопластични ленти, поврзувањето е резултат на интимен контакт и автохезија. Автохезијата започнува по започнување на интимен контакт. Различни модели на поврзување се предложени во литературата во зависност од видот на процесот [64, 66, 71, 72, 73]. Модел на сврзување од Mantel и Springer [66] е како што следува:

$$D_b = D_{ic} \cdot D_h \quad (4.5)$$

За некои процеси потребно е долго време на процесирање за да дојде до комплетно поврзување на слоевите. Меѓутоа, за AFP или ATL процесите температурата на полимерот се покачува до температурата на топење пред започнување на интимниот контакт [63].

Подоцна Stokes-Griffin и Compston [74] откриле дека поврзувањето на термопластичните ленти врз основа на јаглеродни влакна и PEEK со примена на AFP или ATL се одвива на температури под температурата на топење и над температурата на стаклосување. Тие забележале дека PEEK полимерите се многу аморфни за време на консолидацијата и потребно е краткото време на процесирање со AFP или ATL процесите при што се користат екстремните брзини на ладење (1000 °C/s), а полимерот се загрева над температурата на топење пред започнување на интимниот контакт.

Постојат два вида празнини кои се својствени за процесот на консолидација на самото место: интраламинарни и меѓуламинарни. Интраламинарна празнина се појавува за време на импрегнацијата на лентата, додека, меѓуламинарната празнина е главно резултат на процесот на полагање на лента. Интраламинарната празнина е вградена во лентата. Преку микрографски снимки на влезна препрег лента и на готов ламинат добиен од тој препрег, направени во истражувањата на Gruber et al. [67], не е забележана никаква промена во фракцијата на празнини, ниту во нивната форма или големина. Врз основа на тоа тие заклучиле дека ATL/AFP процесот не е во состојба да ја намали содржината на интраламинарната празнина [67].

4.2.1.4. Кристалност

Кристалноста влијае на механичките својства на термопластичните композити. Повисокиот степен на кристалност ја зголемува јакоста и крутоста [75]. Од друга страна, понискиот степен на кристалност ја зголемува отпорноста на удар и јакоста на кршење [76, 77]. Степенот на кристалност зависи од историјата на термичките процеси. Малите брзини на ладење резултираат со повисок степен на кристалност и обратно. Оттука, степенот на кристалност постигнат преку консолидација на самото место на полагање на лентата е ограничен заради екстремно високите брзини на ладење. Kumar et al. [78] го мереле степенот на кристалност на PEEK, како и брзината на раст на сферолити (надмолекуларни форми на семикристални полимери) за примероци загреани на температура на топење од 380 °C и 420 °C, потоа ладени до температура на

кристализација од 300 °C или 320 °C со брзина од околу 3 °C / s [78]. Тие заклучиле дека степенот на кристалност и големината на кристалитите е поголема за примероци ладени од повисока температура на топење. Со други зборови, при постојана брзина на ладење, големината на сферолитите на полимерот зависи од максималната температура на процесирање.

Sonmez и Hahn [79] добиле дека степенот на кристалност на термопластичен ламинат добиен од еднонасочни ленти врз основа на јаглеродни влакна и PEEK е помеѓу 25% до 35% при процес на консолидација на само место. Слични степени на кристалност се добиени и во други истражувања што укажуваат на тоа дека PEEK не е чувствителен на брзините на ладење вклучени во процесот ATL / AFP [80, 81].

4.3. Актуелни истражувања за роботизираните ATL/AFP постапки за добивање на композитни структури

Примената на ласерска технологија во роботизирани процеси за автоматско полагање на влакна/ленти датира од 1980-тите. Beyeler, Philips и Gucerі [57] ја испитувале консолидацијата на термопластичните ленти со примена на 80W CO₂ ласер за загревање. Нивните истражувања, како и подоцнежните експериментални истражувања направени од Agrawal et al. [59], Rosselli et al. [83] укажуваат дека подобра консолидација на термопластичните слоеви на самото место се добива кога се применува унифициран термички модел со примена на поширок зрак со поголема ласерска моќност. Mazumdar and Ноа [84] исто така во нивните истражувања применувале сличен CO₂ ласер за загревање и го проучувале ефектот на моќноста на ласерот, притисокот и брзината на таложење на слоевите врз јачината на врската меѓу слоевите. Тие добиле дека врз квалитетот на врската доминантен ефект има моќноста на ласерот, а минимален ефект има силата на притискање на ролерот. Grove [85] во своите истражувања работел на моделирање на процесите за консолидација на самото место и од направените експерименти заклучил дека добиената лоша кристалност се должи на високата брзина на ладење. Yousefroug и Ghasemi Nejhad [86] подоцна предложиле пред-загревање на лентата под температурата на стаклосување T_g за постигнување на подобра консолидација на ламинат. Како и да е, до крајот на 1990-тите години развојот на автоматизираните постапки за полагање на влакна/ленти со примена на ласер за загревање бил бавен поради недостатокот на ласерски системи со голема моќност и со

континуиран бран од една страна и популарност од примена на загревање со топол гас (HGT процес) од друга страна.

Денес, индустриите и институциите за научни истражувања прават многу истражувања за примена на ласер во автоматизираните постапки за полагање на влакна/ленти. Комерцијално се достапни ласерски системи со висока моќност до 10 kW, па дури и повеќе доколку е потребно. Покрај тоа, направен е развој и за примена на приспособливи компакциони ролери за притискање, изработени од силиконски материјали. Оттука, неодамнешните резултати добиени од истражувањата на Compston и Stokes-Griffin [55, 56] покажале дека рамни ламинатни плочи добиени со загревање со помош на ласер имаат јачина на смолкнување на слоеви слична како како кај ламинатни плочи консолидирани дополнително со примена на автоклав. Сепак, постигнувањето на целосна консолидација со примена на роботизирани процеси бара реализирање на дополнителни истражувања поврзани со оптимизација на многу параметри за добивање на композитни делови со различна големина и форма.

Во трудот на D. H. – J. A. Lukaszewicz [2] дадени се инженерските аспекти на автоматското полагање на препрег ленти за добивање на современи композити со добар квалитет за примена во авионската и автомобилската индустрија и др. Прикажан е историскиот развој на современите технологии како и последните истражувања за двете автоматизирани постапки ATL/AFP за полагање на терморективни и термопластични препрег материјали. Во рамките на овој труд објеснети се во детали двете роботизирани постапки и дадени се предностите од нивна примена како и разликите што постојат меѓу нив. ATL процесот се развивал уште од 1970-тите години како автоматизирана верзија на рачното поставување на ленти и нудел висока продуктивност и сигурност за добивање на едноставни или не многу комплексни делови. Особено, овој процес тогаш бил продуктивен за едноставни и рамни делови и можел да се употребува и за материјали со поголема површинска маса и тежина и тоа само со неколку модификации. Идните развојни движења биле насочени кон подобрување на ATL процесот и добивање на структури со ниски трошоци, а со примена на препрег материјали со повисоки површински маси. AFP процесот претставувал подобрување на ATL процесот со тоа што со овој процес се овозможило поставување на потесни препрег ленти и добивање на комплексни структури. На тој начин загубата на материјал се намалила, а се зголемила продуктивноста и на комплексни структури. Во 1980 – тите години веќе AFP процесот станал релативно зрел процес со голем потенцијал за негова апликација. Меѓутоа,

потребно било процесот континуирано да се подобрува за поголема продуктивност. Се очекувале подобрувања во смисла на подобро програмирање, намалување на секундарните операции, намалување на интеракцијата во одредено време, намалување на повеќекратни операции и слично. Денес, AFP процесот е применлив за добивање на делови за авионска индустрија, но неопходен е понатамошен развој и модификации на процесот за да истиот биде применлив за поставување на пошироки ленти и материјали со поголема површинска маса. J. Sloan [87] објаснува дека дизајнерските пристапи и софтверските пакети што се користат во овие автоматизирани ATL/AFP процеси често пати произлегувале од искуствата за производство на композитни структури со рачно поставување на термопластични или терморективни материјали. Меѓутоа, тие се недоволно интегрирани кај автоматизираните машини за поставување на ленти и се појавиле низа ограничувања во процесите и затоа сеуште е потребно да се прават измени и развојни решенија за истите. Меѓусебната поврзаност меѓу процесните параметри, својствата на материјалот и јачината на врската меѓу интерламинарните слоеви истражувана е од авторите W.J.B.Grouve, L.L.Warnet, B.Rietman, H.A.Visser, R.Akkerman [88] за автоматски процес за поставување на лента со примена на ласер за загревање. Експериментите покажале дека одличен квалитет на интерламинарната врска, а со тоа и добри својства на крајниот композит може да се добие кога положувањето на лентите е со големи брзини, а притоа мала влезна моќност на ласерот во случај кога истиот е првенствено насочен кон лентата.

Роботизираниите процеси за поставување на препрег ленти се многу погодни за ефикасно производство на делови зајакнати со јаглородни влакна особено за примена во авионска и друга индустрија. Внесување на топлина со помош на загревање со радијално зрачење нуди предности за овие процеси и е добро применето во различни форми. T. Orth, C. Weimer, M. Krahl, N. Modler [4] во нивните истражувања го анализираат и презентираат радијационото загревање со помош на ласер и инфрацрвени зраци на терморективни и термопластични препрег ленти при нивно полагање со помош на робот. Притоа, презентирани се карактеристиките, сличностите и разликите од примена на ласерски и инфрацрвени извори на топлина. Исто така, анализирана е интеракцијата на материјалот при негово загревање со помош на ласер или со инфрацрвени зраци. Во рамките на нивното истражување како и во истражувањата на авторите C. M. Stokes-Griffin., P. Compston, T. I. Matuszyk, M.J. Cardew-Hall [89]; P. Hormann, D. Stelzl, R. Lichtinger, S.Van Nieuwenhove, G. M., Carro, K.Drechsler [90] и во референцата [91] од

авторот S. M. Grove направена е нумеричка термичка анализа за предвидување на температурата во точката каде зраците паѓаат врз материјалот, што всушност е од големо значење за процесите. Во нивните истражувања дадена е табела со преглед на постоечките нумерички модели на термичка анализа што ги опфаќаат изворите на зрачење на топлина и тоа и за термопластичен и терморективен материјал. Во трудовите на горенаведените автори направена е термичка анализа на поставување на термопластичен препрег материјал. За таков тип на материјал топлината што се ослободува или апсорбира за време на вцврстувањето (кристализацијата) и топењето на полимерната матрица соодветно, станува нула. Кога брзината на поставување на термопластичните ленти е голема, тогаш топлината која се внесува од изворот на ласерот до влезот во материјалот е занемарлива и незначителна. Затоа, истражувачите заклучиле дека треба да се направи добар модел на загревање на термопластичниот материјал во корелација со аголот под кој паѓаат радијалните зраци врз него и брзината на поставување на ласерот за да дојде до успешно поврзување на слоевите. Меѓутоа, кога авторите P. Normann, D. Stelzl, R. Lichtinger, S. Van Nieuwenhove, G. M., Carro, K. Drechsler [90] го анализирале полагањето на терморективните препрег материјали, заклучиле дека топлината што се ослободува како резултат на егзотермната реакција не може да се занемари затоа што се појавува вмрежување на полимерната матрица и затоа моделот на термичко загревање на овие материјали е различен. Целта на термичкото моделирање и кај двата типови на материјали била да се постигне униформно зрачење по ширината на материјалот и доволно време и брзина на поставување за да настане поврзување на слоевите препрег што ќе резултира во крајна структура со добри карактеристики. Претпоставките добиени од моделот покажале отстапување од реално добиените податоци но, во очекувани граници на грешка и отстапувања. Иако примената на ласерски и инфрацрвени технологии е различна, интеракциите меѓу слоевите материјал се анализирани врз постоечките феномени за загревање со зрачење на материјалот со одредени бранови должини од страна на авторите F. Rosselli, M. H. Santare, S. I. Gucerì [92]. Конусниот агол под кој радијалните зраци паѓаат врз материјалот кој истовремено е под притисок на ролерот ја погодува шуплината која е во форма на клин формирана од подлогата и потисниот ролер и предизвикува различни нивоа на рефлексија. Преку пренесувањето, рефлексијата и апсорпцијата на радијалните зраци, анализирани се феномените на загревање на два типови на материјали и тоа CF/PEEK и CF/PA12 и донесени се заклучоци за интеракцијата меѓу слоевите материјал,

а тие резултати се поврзани и со вкупните карактеристики на добиените крајни структури. Како краен заклучок е дека инфрацрвените ламби и ласерските извори на топлина се добри извори за загревање на термопластични материјали. Врз основа на сите анализи, развиени се и верификувани неколку модели за прецизно предвидување на температурите на материјалот.

Во листата на разгледувани референци има многу што се однесуваат на истражувања за влијанието на технолошките параметри врз автоматизираните процеси како и за оптимизација на истите за добивање на квалитетна композитна структура. Во референцата со број [93] од авторите F. O. Sonmez, M. Akbulut развиена е шема за оптимизација на роботизираните процеси за поставување на ленти. Одделно во нивното истражување се разгледувани две цели за оптимизацијата и тоа едната да се минимизира остатокот на напрегања при јачина на истегнување, а другата да се зголеми продуктивноста на процесот со примена на максимална можна брзина на полагање. Двете поставени цели всушност биле земени како ограничувања во постапките на оптимизација. Во нивните истражувања биле избрани технолошки параметри кои треба со нивна промена да обезбедат добро поврзување меѓу лентите, а притоа термичката деградација да не биде прекумерна. Со цел да се утврди распределбата на температурата, преостанатите напрегања, квалитетот на врската и термичката деградација, биле користени претходно развиени модели на процеси. Добиените резултати покажале дека може да се постигне значително подобрување на процесите преку оптимизација и притоа да се добие ламинат со прифатлив квалитет што ќе може да се произведе на лице место.

Поврзаноста меѓу технолошките параметри на процесот, својствата на добиената крајна структура како и јачината на воспоставената интерламинарна врска е анализирана од страна на авторите M. A. Khan, P. Mitschang, R. Schledjewski [94] за автоматизиран процес на полагање на лента. За истражувањето авторите користеле термопластична лента врз основа на полифенилен сулфид (PPS) и еднонасочни јаглородни влакна. Дистрибуцијата на температурата на мандрелот и лентите била мерена за време на процесот на поставување и слепување на слоевите. Потоа добиената композитна структура била механички тестирана, а врз основа на добиените резултати биле менувани параметрите со цел да се добие одличен квалитет на врската што резултира во добри механички карактеристики. За тоа да се реализира потребно било да се применат поголеми брзини и ниска влезна моќност на ласерот и ласерските зраци да бидат точно насочени кон лентата. За да се постигне тоа тие заклучиле дека температурата на лентата

треба да биде повисока од температурата на ламинатот, додека мандрелот на кој се поставуваат лентите да е загреан на температура многу под температурата на топење на PPS. Во трудот [95] на авторите M. Narnhofer, R. Schledjewski, P. Mitschang, L. Perko е даден преглед на процесот на поставување ленти за термопластични композити врз база на полиетер етер кетон (PEEK) и тековната најсовремена симулација на овој процес. Симулацијата на процесот била заснована на анализа на јачина на смолкнување на слоевите термопластичен препрег. Термопластичните материјали покажале однесување на смолкнување со повисоки стапки на смолкнување и затоа, настанатите стапки на смолкнување биле пресметани и споредувани со податоците за вискозност за термопластичниот материјал. Како резултат на оваа анализа, направен е модел кој најдобро го опишува процесот.

M. A. Khan, P. Mitschang, R. Schledjewski [96] го определувале квалитетот на структурни композити добиени врз основа на термопластичен препрег и автоматско поставување на истиот. Притоа за најважни параметри се земени контактниот притисок на ролерот, температурата на поставување и степенот на кристалност. Во трудот направени се два пристапи: едниот зема претпоставка за стабилна состојба и услови и се решава со имплицитна шема и вториот зема динамични услови и ја зема во предвид кинетиката на процесот и се решава со експлицитна шема. Контактниот притисок бил определуван преку механичката анализа и забележан бил поголем притисок на рабовите. Во првиот пристап истражувачите земаат дека брзината на поставување на лентата, аголот и геометријата под кои паѓаа радијалните зраци за загревање се константни за доволно време на воспоставување (слепување) контакт меѓу слоевите. Додека во вториот пристап условите на процесот биле променливи и била анализирана кинетиката на процесот преку термо механички модел за истиот.

Во рамките на литературниот преглед направена е анализа на избрани публикации кои директно, индиректно, во целина или делумно се однесуваат на проблематиката на докторската дисертација. Од анализираните трудови кои се од поново време јасно се забележува дека проблематиката која се истражува во докторската дисертација е атрактивна, современа, недоволно истражена и дека претставува предизвик за истражување. Особено, полагањето на термопластични ленти со помош на роботизирани постапки и добивање на структури без дополнително процесирање претставува област за која сеуште е потребно развој и истражување.

5. ПРЕДЛОЖЕН МОДЕЛ ЗА РАБОТА

За реализација на поставената цел: дефинирање на технолошките параметри на роботизираните постапки за автоматско полагање на влакна/ленти (AFP/ATL) и загревање со помош на ласер за добивање на делови од композитни материјали на самото место, направен е модел за работа кој шематски е претставен на слика 5.1.



Слика 5.1. Шематски приказ на моделот за работа

Во рамките на направениот план за работа, во првиот чекор *Дефинирање* - дефинирани се роботизираните процеси за автоматско полагање на влакна/ленти (AFP/ATL) и загревање со помош на ласер и барањата за квалитет за добиените производи од композитни материјали. Исто така, дефинирани се влезните параметри кои можат да влијаат на идејното решение врз процесот односно добивање на композитни структури на самото место без дополнително процесирање. Тоа се: конститутивните материјали на композитниот производ, типот на јаглородни влакна и полимерна матрица, начинот на полагање на препрег лентите, брзината на полагање, аголот на ласерските зраци, затегање на препрегот, притисокот на валјачето, дијаметарот на валјачето, температурата на загревање, температура на мандрелот (алатот), температура на просторија, избор на оптика и друго. Врз основа на тоа дефинирана е целта во овој докторски труд: дефинирање на најповолни технолошки параметри на автоматизираните AFP/ATL процеси за производство на делови од композитни материјали на самото место, преку избор на влезни фактори кои најмногу влијаат на излезот т.е. карактеристиките на крајниот производ.

Во вториот чекор *Мерење* - направена е објективна процена за тековната состојба на процесот што всушност претставува основа за негово истражување. Собрани се податоци за сите влезови: типови на еднонасочни препрег материјали, тип на влакна, тип на термопластична матрица, вискозитет на матрица, распоред на калемите на кои се намотани препрег лентите, параметрите на машината за автоматско полагање со примена на робот и загревање со примена на ласер, примена на софтвер за дефинирање на патеките на полагање на лентите, дизајн на слоевите и друго. Во оваа фаза направен е избор на карактеристиките преку кои ќе се следи квалитетот на деловите од композитни материјали односно избрана е јакоста при свиткување на примероците ламинатни плочи и оптички и електронски снимки за интерламинарната поврзаност на слоевите во нив. Дефинирани се стандардите по кои ќе се врши нивно тестирање и собрани се податоци за мерење на карактеристиките. За испитување на јачината на свиткување на примероците од композитни материјали избран е стандардот ASTM D790 [97,98]. Во оваа фаза собрани се податоци за процесот за да се направи добра основа за истражување и постигнување на дефинираната цел.

Во третиот чекор - *Анализирање* направена е анализа на влезните фактори кои најмногу влијаат на процесот и со нивно менување може да се влијае на создавање на композитен производ со барани карактеристики на самото место. Врз основа на

практично искуство на производните капацитети поврзани со производство на делови од композитни материјали како и врз основа на искуството во фирмата Микросам од Прилеп која произведува опрема за автоматско полагање на влакна/ленти (AFP/ATL) за добивање на композитни производи со врвни карактеристики, определени се факторите кои влијаат врз квалитетот на производот. Од сите влезни фактори избрани се три кои влијаат на карактеристиките на композитните производи, а тоа се: температура на процесирање, агол на поставување на ласерот и компакционен притисок на валјаче. Тоа значи дека за подобрување на процесот, анализирано е влијанието на трите фактори: x_1 , x_2 , x_3 врз излезот у односно врз напрегањето при свиткување на примероците, ламинатни плочи. Исто така, анализирано е како промената на овие три фактори во предвидениот опсег влијае на постигнувањето на добар интерфејс односно добро поврзување на слоевите на самото место.

Во четвртата фаза **Подобрување** направено е подобрување на процесот за што е користен методот на планирање на експериментите кој што овозможува добивање на максимален број на информации со минимален број на експерименти. Во претходната постапка определени се три фактори кои влијаат на процесот, а исто така анализирана е минималната и максималната нивна граница на варирање т.е. нивото на варирање. Процесот кој зависи од три фактори, x_1 , x_2 , x_3 и кога секој фактор има две нивоа на варирање претставува 2^3 факторен дизајн за кој потребни се 8 тестови ($2^3 = 8$), секој со различна комбинација на факторите и нивоата. Составена е план - матрицата на експериментот и тоа на следниот начин. За:

- x_1 - нивоата менувани се на секој експеримент (т.е. серија на експерименти),
- x_2 - нивоата менувани се на секои два експерименти,
- x_3 - нивоата менувани се на секои четири експерименти, итн.

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

Табела 5.1. План матрица на експериментот

Бр. на експ.	Матрица на планот на експериментот							
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Во првата колона факторот се менува (-1, +1, -1...) на секоја 2⁰ вредност.

Во втората колона факторот се менува (-1, -1, +1, +1...) на секоја 2¹ вредност.

Во третата колона факторот се менува (-1,-1,-1,-1,+1,+1,...) на секоја 2² вредност.

n-тата варијабла се менува на секоја 2ⁿ⁻¹ вредност.

Претпоставениот модел од прв ред за роботизираните процеси за автоматско полагање на влакна/ленти (AFP/ATL) со три фактори е:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 + \varepsilon \quad (5.1)$$

Во последната петта фаза **Контрола** –направена е верификација на добиените модели за автоматизираните процеси. Исто така, добиени се модели во инженерски единици и направена е контрола на истите. Направена е контрола и дискусија на резултатите од испитувањата на карактеристиките како и определување на влијанието на технолошките фактори врз автоматизираните процеси.

6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН ДЕЛ

6.1. Материјали користени за експериментите

За истражувањето во рамките на овој докторски труд користени се три типови термопластични унидирекционални препреги материјали со ознаки: UD1, UD2 и UD3 за производство на примероци – ламинатни плочи од термопластични композитни материјали.

UD1 и UD2 препрег материјалите се врз основа на еднонасочни јаглородни влакна (AS4 јаглородни влакна) и термопластични матрици и тоа полифенилен сулфид - PPS (Ticona 0214 PPS) и полиетер етер кетон PEEK (Vitrex 150 PEEK), соодветно за UD1 и UD2. Овие препрег ленти се од ист производител Suprem, Швајцарија. Јаглородните влакна HexTow® AS4 се континуирани влакна со радиус на влакно $1,378 \times 10^{-4}$ in, Јунгов модул на еластичност на истегнување 241 GPa и јакост на истегнување на влакно 5419 MPa, а се достапни со 3000 (3K), 6000 (6K) и 12000 (12K) филаменти (нишки) во еден сноп [99]. Ова влакно најчесто има обработка на површината (sizing) со што се подобри неговите својства на смолкнување при ракување.

UD3 препрег материјалот е од производителот Toho Tenax, Германија и е исто така врз основа на јаглородни влакна (Tenax®-E HTS45 12K) и полиетер етер кетон PEEK. Термопластичната полимерна матрица PEEK нуди одлична отпорност на хемикалии и растворувачи која во комбинација со Tenax®-E HTS45 јаглородните влакна со висока јакост на истегнување, произведени со површинска обработка за термопластична примена, резултира во препрег материјал кој е добар за добивање на композитни материјали со врвни карактеристики. Карактеристиките на препрег материјалите добиени од производителите Suprem и Toho Tenax се дадени во табела 1 и 2.

Табела 6.1. Карактеристики добиени од производителот Suprem за UD препрег материјалите [100]

<i>Трговско име</i>		UD1 Suprem™ T60% AS4/PPS-214	UD2 Suprem™ T60% AS4/PEEK-150
Карактеристики	Единица	Вредност	Вредност
Површинска маса	[g/m ²]	300	300
Линеарна маса на влакна	[g/m]	5,148	5,148
Волуменски процент на влакна	[%]	60,00	60,00
Масен процент на влакна	[%]	66,54	67,38
Линеарна маса на полимер	[g/m]	2,588	2,493
Ширина на лента	[mm]	25,00	25,00
Дебелина на лента	[mm]	0,19	0,19
Линеарна маса на лента	[g/m]	7,736	7,541
Специфична маса на лента	[g/cm ³]	1,614	1,594
Јачина при истегнување (0°)	MPa	2231	2311
Модул на еластичност при истегнување (0°)	GPa	132	143
Јачина при истегнување (90°)	MPa	65	72
Модул на еластичност при истегнување (90°)	GPa	9,6	10,3

Табела 6.2. Карактеристики добиени од производителот Toho Tenax за UD препрег материјал [101]

		UD3	
<i>Трговско име</i>		Tenax®-E TPUD PEEK-HTS45	
<i>Тип на влакно</i>		Tenax®-E HTS45 12K	
<i>Специфична тежина [g/cm³]</i>		1,77	
<i>Тип на термопластична матрица</i>		PEEK	
<i>Специфична тежина [g/cm³]</i>		1,30	
Карактеристики		Единица	Вредност
Површинска маса на препрег		[g/m ²]	220
Површинска маса на влакна		[g/m ²]	145
Волуменски процент на влакна		[%]	60,00
Масен процент на влакна		[%]	66,00
Ширина на лента		[mm]	6,35 до 304,8
Дебелина на лента		[mm]	0,14
Јачина при истегнување (0°)		MPa	2450
Модул на еластичност при истегнување (0°)		GPa	142
Јачина при истегнување (90°)		MPa	88
Јачина при свиткување (0°)		MPa	1760
Модул на еластичност при свиткување (0°)		GPa	130
Јачина при компресија (0°)		MPa	1545
Модул на еластичност при компресија (0°)		GPa	130

6.2. Добивање на ламинатни плочи со полагање на препрег ленти UD1 и UD2 со ATL постапка

За истражувањата во рамките на овој докторски труд произведени се примероци од композитен материјал – ламинатни плочи со помош на ATL постапка и загревање со ласер (Laser assisted Automate Tape laying – LATL) и од двата типа на унидирекционален препрег UD1 и UD2 кои се врз основа на исти тип на јаглеродни влакна, а различна термопластична матрица. При процесирање на двата типа препрег ленти определено е влијанието на некои технолошки параметри во процесот ATL со примена на ласер. Повеќето од актуелните истражувања, наведени во глава 4.3, направени се за следење и подобрување на технолошките параметри при полагање на термопластични ленти со ATL/AFP постапките за добивање на композитен производ на самото место. При тоа, најчесто следени се промените на температурата на ласерот, притисокот на валјачето, тензијата на препрег лентите, брзината на полагање и аголот на ласерските зраци. Во

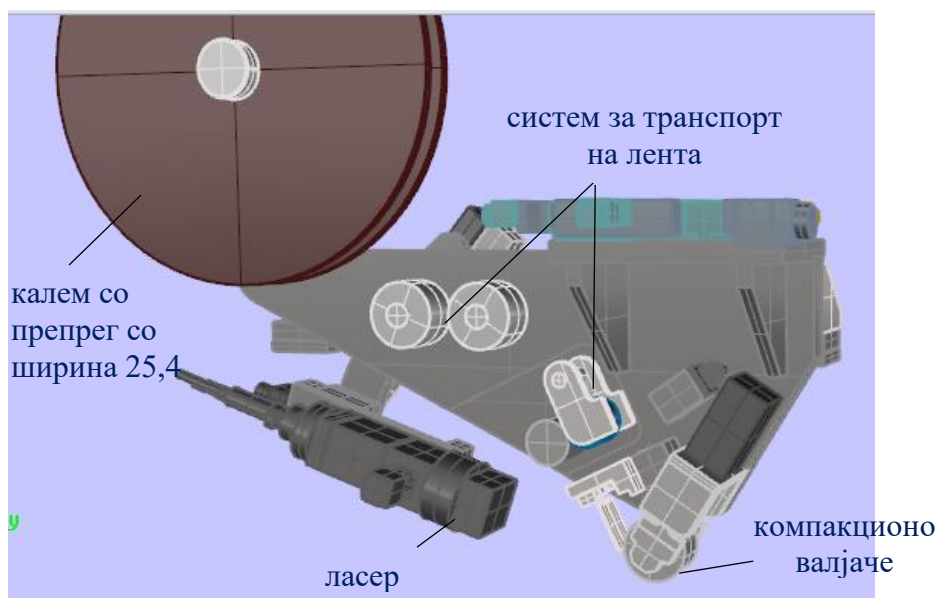
референците [57, 83, 84, 85] направени се истражувања каде како променливи параметри се земени температурата на ласерот, аголот под кој паѓаат ласерските зраци и компакциониот притисок. T. Orth at all. [4] анализирале како радијалното зрачење на ласерските зраци и аголот под кој тие паѓаат во моментот на полагање на лентата влијае на квалитетот на врската меѓу слоевите од добиените ламинати. Во други истражувања, референци [87-93] анализирани се исто така температурата на ласерот односно температурата на процесирање во комбинација со притисокот на валјачето и направени се термички модели со кои се предвидуваат температурите на местото каде валјачето ги притиска и каде доаѓа до интерламинарно поврзување. M. A. Khan at all. [94] ја следеле дистрибуцијата на температурата на мандрелот врз кој се полага и на препрег лентата и аголот на ласерските зраци, додека во референците [95, 96] како најважни параметри се земени компакциониот притисок, температурата на процесирање и степенот на кристалност. Квалитетот на добиените ламинати во сите истражувања е следен преку тестирање на јакоста при смолкнување или јакоста при свиткување на истите, преку термички методи за определување на степенот на кристалност (DSC, TGA) и преку оптички и електронски снимки на попречните пресеци на примероците. Имено, за добивање на квалитетен композитен производ потребно е да се постигне добро интерламинарно поврзување на слоевите и добра консолидација. Добиениот ламинат со повисок степен на кристалност на полимерната матрица, резултира во производ со добри механички карактеристики, а според тоа и со добра поврзаност на слоевите во ламинатот. Бидејќи во рамките на истражувањата во оваа докторска дисертација основна цел е да се добие квалитетен композитен производ од термопластични ленти на самото место, потребно е да се направи анализа на технолошки фактори кои најмногу влијаат на тоа. Повеќето од научните трудови се однесуваат на анализа на температурата на процесирање и компакциониот притисок. Врз основа на направената претрага на литература за влијанието на технолошките параметри на процесот, како и врз основа на искуството на компанијата Микросам од Прилеп која произведува опрема за автоматско полагање на термопластични влакна/ленти ATL/AFP, за истражувањата во оваа докторска дисертација, како променливи параметри земени се: температурата на процесирање, аголот на поставување на ласерот и притисокот на валјачето. Останатите параметри како што се: тип на оптика, брзина на полагање, температура на мандрел и др. се земени за константни.

Ламинатните плочи произведени се со помош на глава за ATL автоматско полагање на препрег лента, произведена од Микросам, Р. Северна Македонија претставена шематски на слика 6.1. Од четирите машински конфигурации кои постојат за автоматско полагање на препрег ленти објаснети во глава 4.1, *конфигурација со роботска рака* е применета за производство на примероците од композитни материјали за истражувањата во овој докторскиот труд (слика 6.2).

Главните делови што ги содржи ATL главата се:

- систем за транспорт на лента,
- одмотувач на препрег,
- систем за порамнување на работ на лентата,
- систем за детекција на дефекти,
- систем за тензија,
- систем за сечење на препрег,
- систем за загревање на препрегот во текот на полагањето,
- систем за сечење по контура,
- систем за контрола на компакцијата.

ATL главата има валјаче за компакција со надворешен дијаметар од 90 mm.



Слика 6.1. Шематски приказ на ATL глава

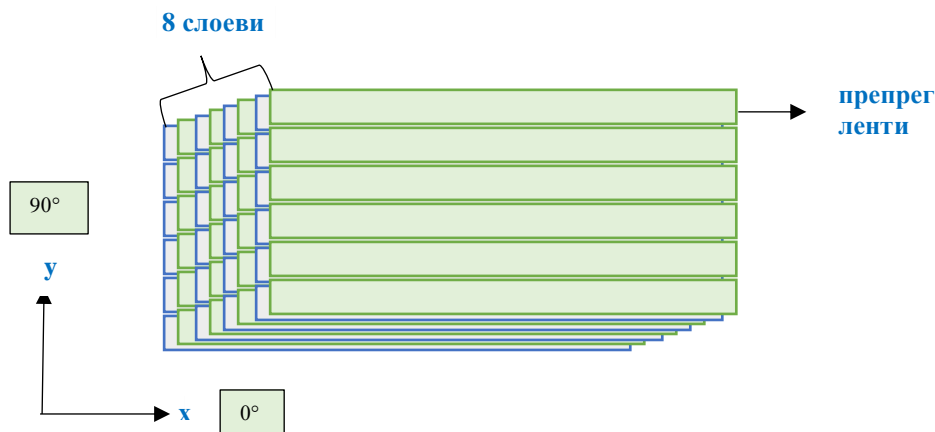
Процесот на полагање на препрег лентите вклучува нивно повлекување преку соодветниот систем и понатамошно водење. На патот кон валјачето за компакција, препрег лентата е загревана на соодветна температура (врз основа на видот на полимерот) со помош на ласер. Лентата потоа е полагана на алатот (рамна плоча за нашите истражувања) и е компактирана со помош на валјаче.



©Микросам

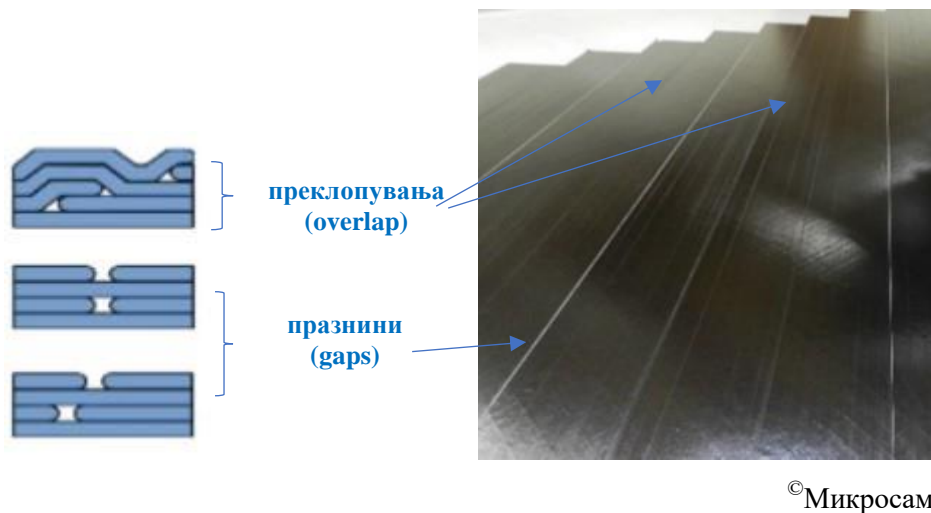
Слика 6.2. Полагање на UD1 и UD2 препрег ленти со помош на глава за ATL автоматско полагање со примена на ласер за загревање, произведена од Микросам, Р. Северна Македонија

Полагањето на лентите направено е со константна брзина од 9 m/min, а лентите со ширина од 25 mm како што се добиени од производителот Suprem, Швајцарија, полагани се под агол од 0° односно во насока на влакната. Избраната брзина за полагање на лентите е земена како нај соодветна врз основа на искуството во фирмата Микросам. Константирано е дека како параметар не влијае значајно на процесот ако се променува температурата на процесирање и притисокот на валјачето, што е случај во истражувањата во оваа докторска дисертација. Дополнително овој параметар е земен како средна вредност од гранични вредности 5 m/min и 12 m/min што може да се користат за полагање на препрег во истражувањата, а тоа е врз основа на ласерот кој се применува во истите. Сите ламинатни примероци произведени се со по осум слоеви, а сите слоеви полагани под агол од 0 степени, така што, дебелината на добиените ламинатни плочи е ~ 1,5 mm ($8 \times 0,19 \text{ mm} = 1,52 \text{ mm}$). Добиените ламинатни плочи се со димензии: должина 300 mm и ширина 150 mm односно за еден слој полагани се 6 ленти препрег како што е прикажано на сликата 6.3.



Слика 6.3. Шематски приказ на пакет од 8 слоеви

При полагањето на препрег лентите може да се појават неправилности кои резултираат со ламинатни плочи со послаби карактеристики. Неправилностите произлегуваат од точноста на роботот која влијае врз положбата на главата (позиција и ориентација). Други влијателни фактори можат да бидат геометријата на објектот врз кој се полага, како и варијациите на технолошките параметри (својствата на препрегот, температурата, аглите на полагање, меѓанизмот на сечење и слично). Со примена на софтверот MikroPlace[®] на компанијата Микросам [48, 82], валјачето на ATL главата прецизно ја следи патеката на полагање, а подлогата на која се полагаат лентите е доволно рамна површина за да се избегне нејзиното влијание. Затоа, во рамките на истражувањата определувани се неправилностите произлезени од технолошките параметри, а следени се преку испитување на механички карактеристики на одбраните ламинатни плочи и нивна микроструктурна анализа преку оптички и електронски снимки. Има многу научни истражувања и публикации [92, 96, 102, 103, 104] кои ги анализираат појавените неправилности произлезени од технолошките параметри, а како најчести неправилности што се јавуваат при полагање на препрег лентите се: празнини помеѓу полаганите ленти (gaps) поголеми од зададената толеранција и преклопување на соседните полагани ленти (overlap), како што е прикажано на слика 6.4.

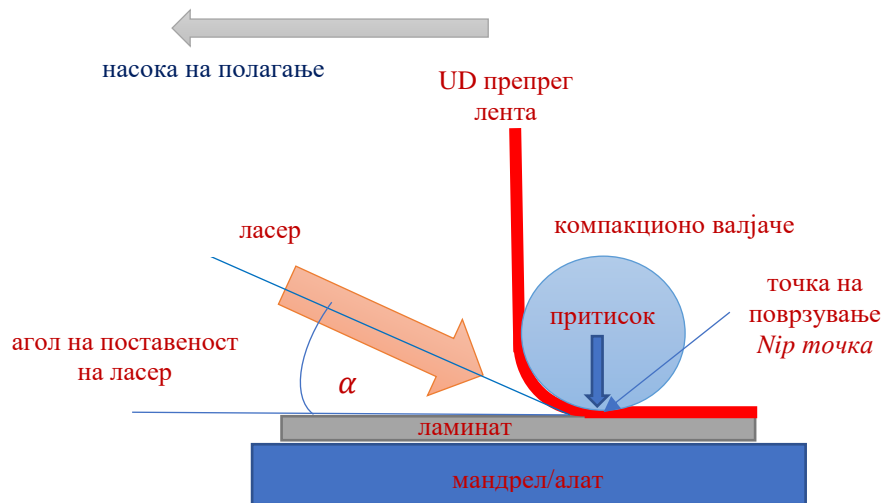


Слика 6.4. Празнини и преклопувања кај композитни материјали (сопствени истражувања)

Во референците [102 -104] анализирани се неправилностите што се појавуваат при полагање на препрег лентите, а кои произлегуваат од технолошките параметри. Истите следени се преку анализа на механички карактеристики на добиените ламинати и преку анализа на снимки на примероци со оптички микроскоп. Теоретските и експерименталните истражувања посочуваат на важноста на голем број технолошки параметри кои влијаат на создавање на дефекти, а како највлијателни се анализирани тензијата на препрег лентите, температурата на ласерот и компакциониот притисок.

6.2.1. Примена на планирање на експерименти за добивање на ламинатни плочи со полагање на препрег ленти UD1 и UD2 со ATL постапка

Во рамките на истражувањата во овој докторски труд направено е планирање на експериментите односно применет е полн три факторен експериментален дизајн за процесите за добивање на ламинатни плочи од двата типа на термопластични препрег материјали UD1 и UD2. Согласно тоа, произведени се примероци – ламинатни плочи, со варијација на три параметри на две нивоа - 2^3 факторен експериментален дизајн. Во факторниот дизајн, температурата на процесирање земена е за прв фактор, како втор фактор е земен аголот на поставување на ласер, а како трет фактор - компакциониот притисок на валјачето, како што е дадено на слика 6.5.



Слика 6.5. Влијателни фактори при полагање на UD препрег ленти

Ознаките на примероците се: LATL-UD1 за ламинат врз основа на UD1 и LATL-UD2 за ламинат врз основа на UD2. Одредувањето на нивото на факторите и кодирањето на променливите направено е во согласност со Табела 6.3, соодветно за двата типа материјали. Имено, за првиот фактор за примерок LATL-UD1 ниското и високото ниво се 360°C и 380°C соодветно, за вториот фактор 270N и 370N и за третиот фактор 22° и 25°. Секој фактор има две нивоа на варијација, ниско и високо. Ниското има вредност (-1), а високото има вредност (+1). Постојат две нивоа на факторите $p = 2$ и осум комбинации ($N = 8$):

$$N = p^k = 2^3 = 8 \quad (6.1)$$

каде: N = број на комбинации; k = број на фактори; p = број на нивоа на факторите.

Во согласност со процедурата за планирање на експериментите сите можни комбинации на факторите се земени на сите нивоа на варијација (8 експерименти, Табела 6.4).

Планирањето на експериментите овозможува математичко прикажување на истражуваниот процес во рамките на истражуваниот домен. Со цел да се вклучи целиот истражуван домен, избрани се централните точки (нулта ниво, $X_i = 0$) од двата опсега да бидат експериментални точки. За примероците LATL-UD1 за температура на процесирање избрана е експерименталната точка да биде 370 °C, за компакционен притисок на валјаче 320 N и за агол на поставување на ласер 23,5 ° што одговара на претходно дефинираните нивоа. Исто така, избрани се централните точки за примероците LATL-UD2, како што е прикажано во Табела 6.3. За статистичката анализа

реализирани се по пет тестови од секоја комбинација, така што бројот на репликации е пет. Користен е линеарен модел од прв ред со интеракции меѓу факторите за да се предвиди функцијата на одзив т.е. напрегање при свиткување на ламинатните примероци во истражуваниот домен.

Табела 6.3. Кодирање на факторите за сите примероци

Примерок со ознака LATL-UD1			
<i>Код</i>	Температура на процесирање, °C X_1	Агол на поставеност на ласер, ° X_2	Компакционен притисок на ролер, N X_3
Нулно ниво, $x_i = 0$	370	23,5	320
Интервал на варијација	10	1,5	50
Горно ниво, $x_i = +1$	380	25	370
Долно ниво, $x_i = -1$	360	22	270
Примерок со ознака LATL-UD2			
Нулно ниво, $x_i = 0$	450	23,5	457,5
Интервал на варијација	30	1,5	72,5
Горно ниво, $x_i = +1$	480	25	530
Долно ниво, $x_i = -1$	420	22	385

Табела 6.4. Услови на експериментите

N	Фактори				
	X_1 (°C)		X_2 (°)	X_3 (N)	
	LATL-UD1	LATL-UD2	LATL-UD1 LATL-UD2	LATL-UD1	LATL-UD2
1	380	480	25	380	530
2	360	420	25	380	530
3	380	480	22	380	530
4	360	420	22	380	530
5	380	480	25	270	385
6	360	420	25	270	385
7	380	480	22	270	385
8	360	420	22	270	385

Бидејќи секој од осумте експерименти е реплициран пет пати, определена е дисперзијата на резултатите според следната равенка;

$$S_j^2 = \frac{1}{k-1} (y_{ji} - \bar{y}_i)^2 \quad (6.2)$$

На овој начин пресметана е дисперзијата за останатите тестови од секоја серија поодделно. Потоа, определена е средната вредност на дисперзијата, според равенката:

$$S_{j\text{sr.}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2 \quad (6.3)$$

За проценка на дисперзијата се примени Кохреновиот критериум:

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} \quad (6.4)$$

G_p претставува пресметана вредност на Критериумот на Кохрен и таа вредност се споредува со табеларната вредност на Кохрен, $G_{\alpha, f, N}$, во зависност од нивото на значајност α , бројот на степени на слобода, f ($f = k-1$) и бројот на опити N . Табелата за критериумот на Кохрен е дадена во Прилог 1.

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

Редот на дисперзија се смета за хомоген ако:

$$G_p \leq G_{\alpha, f, N} \quad (6.5)$$

Исполнувањето на горенаведениот услов укажува на репродукцибилност на експериментите, а проценката за дисперзијата на резултатите од тестирањата е дека таа е хомогена.

После пресметките за дисперзијата на експериментите, врз основа на полниот факторен експериментлен дизајн, потребно е да се пресметаат регресионите коефициенти: $(\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}, \beta_{123},)$. Потоа, се проверува дали регресионите коефициенти се значајни или не влијаат значајно на процесот. Определувањето на значјноста на регресионите коефициенти се направи со помош на Студентовиот (Student) критериум. За да се утврди дали тие се значајни или не, пред се, треба да се процени варијансата при која тие се определуваат, според равенката:

$$S_\beta = \sqrt{\frac{S_j^2}{N}} \quad (6.6)$$

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

$$|\beta| \geq S_{\beta} t \quad (6.7)$$

каде што t е табеларна вредност на Студентовиот (Student) критериум. Во Прилог 2 се дадени табеларните вредности за Студентовиот критериум. Кога критериумот не е задоволен, тогаш коефициентот на регресија се изостава како незначаен т.е. невлијателен коефициент во регресионата равенка.

Коефициентот β_0 претставува средна вредност од сите одзиви (\bar{y}). Останатите коефициенти од равенката се пресметуваат преку следните равенки:

$$\beta_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j; \quad \beta_{im} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{im} y_j; \quad (i \neq m) \quad (6.8)$$

каде што: x_{ij} – претставуваат кодирани вредности на коефициентите.

Кодирани вредности на факторите се дадени во табела 6.3, а се добиени од комбинации на варијаблите во експериментот и границите на нивното варирање (максимална и минимална граница). Овие кодирани вредности потребни се за да се определи знакот пред коефициентите (β_i). Тие се пресметуваат по формулата:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i} \quad (6.9)$$

X_i е реална променлива;

X_{i0} е средната вредност на границите на варирање;

ΔX_i е интервалот на промена на границите на варирање.

На таков начин се добива регресиона равенка според претпоставениот модел од прв ред односно равенка (5.1).

После определување на регресионата равенка се провери нејзината адекватност со помош на критериумот на Фишер (Fisher). Равенката е адекватна ако е исполнет условот:

$$F_p \leq F_t \quad (6.10)$$

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_j^2} \quad (6.11)$$

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (\bar{y}_j - y_j)^2}{N-k} \quad N - k = 8 - 5 = 3 \quad (6.12)$$

Во равенката (6.12) Y_j ги означува вредностите на одзивот односно на напрегањето при свиткување пресметани според добиената регресиона равенка со замена на соодветните кодирани вредности на факторите +1 и -1, т.е. со нивните вредности кога се на долно и горно ниво, соодветно. Врз основа на пресметката за разликите меѓу пресметаните вредности според добиениот модел и експериментално добиените вредности за напрегањето при свиткување се добива вредност за F_p . Потоа се определува табеларната вредност на Фишеровиот критериум F_t и се проверува дали е задоволен условот даден со равенка (6.10), а врз основа на тоа се заклучува дали моделот е адекватен и дали истиот може да се користи.

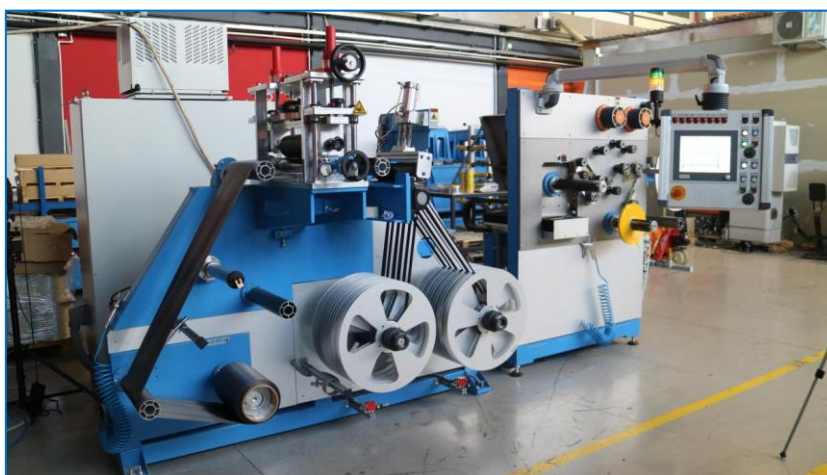
6.3. Добивање на ламинатни плочи со полагање на UD3 препрег ленти со ATL и AFP постапка

Во рамките на истражувањата во докторската дисертација произведени се примероци ламинатни плочи со полагање на UD3 препрег ленти со примена и на двете роботизирани ATL и AFP постапки. Направена е анализа како промената на избраните технолошки фактори влијаат при полагање на овој препрег и направена е споредба на ламинатните плочи добиени со двете постапки.

За добивање на ламинатните плочи со ATL постапката користена е глава за ATL полагање на препрег лента, произведена од Микросам, Р. Северна Македонија и опишана во глава 6.2. Ламинатните плочи со оваа постапка произведени се со примена на планирање на експериментите со употреба на три променливи параметри со две нивоа на варијација. Повторно беше направено планирање на експерименти затоа што овој препрег иако го има истиот состав (PEEK/CF) како UD2 препрегот, термопластичната полимерна матрица и јаглеродните влакна се различни типови и од различни производители во споредба со тие кај UD2 препрегот, а тоа бара изменети услови за процесирање. Како променливи параметри исто се земени: температурата на процесирање (фактор X_1), аголот на поставување на ласерот (фактор X_2) и притисокот на валјачето (фактор X_3) при константна брзина на полагање е од 9 m/min. Сите произведени примероци ламинатни плочи се со димензии (300 x 150) mm, се состојат од 8 слоеви, а секој слој содржи 6 ленти препрег со ширина од 25 mm, како што се добиени од производителот Toho Tenax, Германија. Во табела 6.5 се дадени параметрите кои се

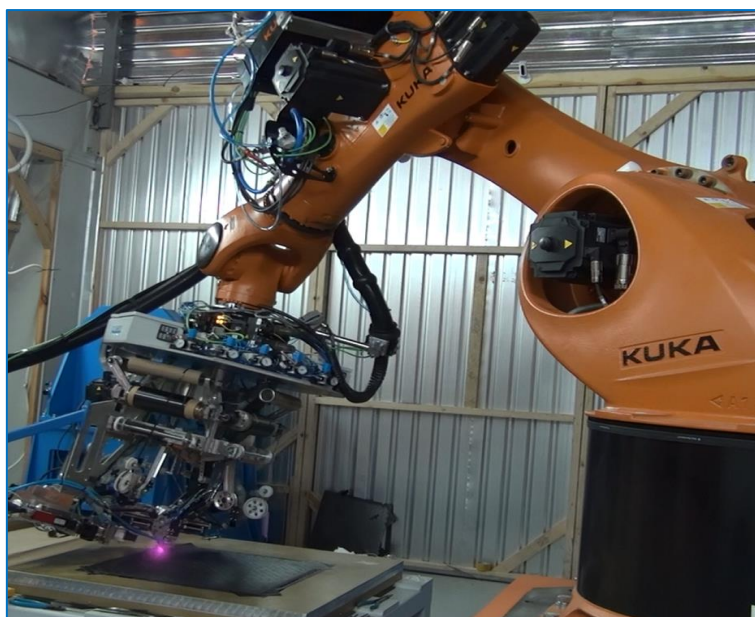
користеа за производство на ламинатните плочи, односно план матрицата на експериментите.

За добивањето на примероци со AFP постапката користена е UD3 препрег лента со ширина од 304,8 mm која е сечена (sliting) на ленти со ширина од 6,35 mm на машина за слитување и премотување, произведена од Микросам. На слика 6.6. дадена е машината за слитување на препрегот при што од неговата ширина се добиваат 48 ленти препрег. Полагањето на лентите правено е со примена на AFP глава за полагање на препрег лента, произведена од Микросам, која е поставена на роботска рака. На слика 6.7. претставена е роботската рака со AFP главата со која се полагаа UD3 препрег лентите. AFP главата за полагање на препрег влакна ги има истите елементи како и ATL главата. Разликата е во тоа што кај AFP главата има 4 калеми со ленти препрег со ширина 6,35 mm и при полагањето овие 4 ленти препрег формираат еден курс со ширина 25,4 mm. Шест вакви курсеви создаваат еден слој односно една ламина. Ламинатните примероци произведени се со 16 слоеви положани под агол од 0° , така што дебелината на добиените ламинатни плочи е ~ 2 mm. Добиените ламинатни плочи се со димензии: (300 x 150) mm односно за еден слој положани се 6 курсеви или 24 ленти препрег. Конструкцијата на една ламина односно на еден слој е прикажана на сликата 6.8. Полагањето на лентите препрег правено е на услови на кои се добиваат најдобри примероци ламинатни плочи при процесирање на овој препрег со ATL постапка. Во табела 6.6 дадени се условите односно параметрите при кои се полагаа лентите препрег со AFP постапка.



©Микросам

Слика 6.6. Машина за слитување и премотување на препрег, производство на Микросам

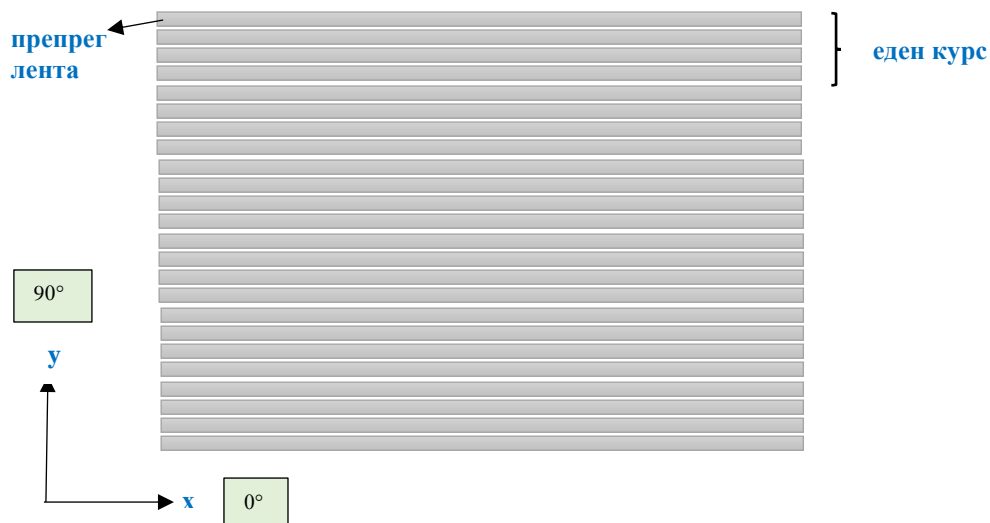


©Микросам

Слика 6.7. Роботска рака со AFP глава со 4 калеми во Институтот за современи композити и роботика (произведена од Микросам - Прилеп)

Табела 6.5. Процесни параметри за експериментите на примерок со ознака **LATL-UD3**

N	Матрица на планот на експериментот								карактеристики (услови на експериментот)		
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	X ₁ (°C)	X ₂ (°)	X ₃ (N)
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	480	25	530
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	420	25	530
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	480	22	530
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	420	22	530
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	480	25	385
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	420	25	385
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	480	22	385
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	420	22	385
Нулно ниво, $x_i = 0$					450		23,5		457,5		
Интервал на варијација					30		1,5		72,5		
Горно ниво, $x_i = +1$					480		25		530		
Долно ниво, $x_i = -1$					420		22		385		



Слика 6.8. Конструкција на една ламина положана со AFP постапка

Табела 6.6. Услови на полагање на примероци со ознака LAFP-UD3 со AFP постапка

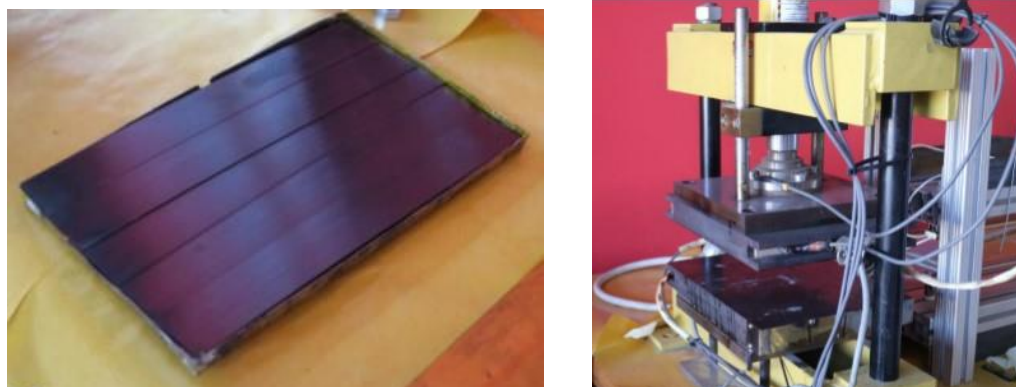
LAFP-UD3	Температура на процесирање, °C	Агол на ласер, °	Притисок на валјаче, N
1	480	25	530
2	480	22	530
3	480	25	385
4	420	22	530

6.4. Добивање на композитни плочи со рачно полагање на препрег ленти UD1, UD2 и UD3 со конвенционално компресионо пресување

Во рамките на истражувањата за докторската дисертација направени се ламинатни плочи од трите типови унидирекционални препрег ленти со рачно полагање во калап и компресионо пресување во преса.

Од UD1, UD2 и UD3 препрег лентите со ширина 25 mm отсечени се делови со должина 300 mm. Шест такви препрег ленти создаваат еден слој исто како и при автоматското полагање со робот. Подготвен е пакет од осум слоеви со димензии (300 x 150) mm кој потоа е процесираан во преса. Подготвениот пакет слоеви за пресување и

пресата прикажани се на слика 6.9, а условите за процесирање на препрег материјалите се дадени во табела 6.7.



©Микросам

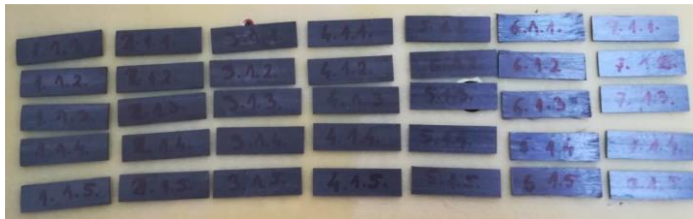
Слика 6.9. Подготвен пакет слоеви за компресионо пресување и преса

Табела 6.7. Услови на компресионо пресување

Тип препрег	Ознака	Температура (°C)	Притисок (bar)	Време на загревање (min)	Време на ладење (min)
UD1	CM-UD1	290	25	20	60
UD2	CM-UD2	350	35	20	60
UD3	CM-UD3	350	35	20	60

6.5. Определување на напрегање при свиткување на примероците добиени од ламинатните плочи

За испитување на напрегање при свиткување на добиените ламинатни плочи користен е стандардот ASTM D790 [99]. Според тој стандард, од секоја композитна плоча отсечени се по пет – примероци за тестирање во надолжна насока, со димензии според ASTM D790. Пред испитување за секој примерок измерена е дебелината и ширината со микрометар за правилна пресметка на површината. На слика 6.10 претставени се подготвените примероци и тестирање на еден примерок.



Слика 6.10. Подготвени примероци и тестирање на еден примерок

Со цел да се определи напрегањето при свиткување, епруветите изложени се под дејство на сила. Испитувањата во рамките на оваа докторска дисертација направени се според методот со 3 точки на свиткување. Овој метод многу често се користи за механичка карактеризација поради едноставноста на подготовка на примероците и нивното тестирање. Кога примерокот е оптоварен како на слика 6.10, горната површина на ламинатот е изложена на компресија, долната површина е изложена на истегнување, додека во средишниот дел на ламинатот настанува смолкнување.

За испитување на напрегањето при свиткување на ламинатните плочи користена е универзална машина за тестирање од производителот Chengde, модел Jingmi, а брзината на тестирање е 5 mm/min.

При испитување на епруветите, напрегањето при свиткување е пресметано во согласност со равенката 6.13:

$$\sigma_f = \frac{3F_{max}L}{2bd^2} \quad (6.13)$$

каде што:

σ_f – напрегање на свиткување изразено во МПа;

F_{max} – максимална сила на оптоварување пред да настане кршење во N;

L – растојание меѓу потпорите каде примерокот се потпира во mm; За тестирање на примероците, растојанието меѓу потпорите е 25 mm. Односот $L:d$ треба да биде 16 (со толеранција ± 1).

b – ширина на испитуваната епрувета во mm и

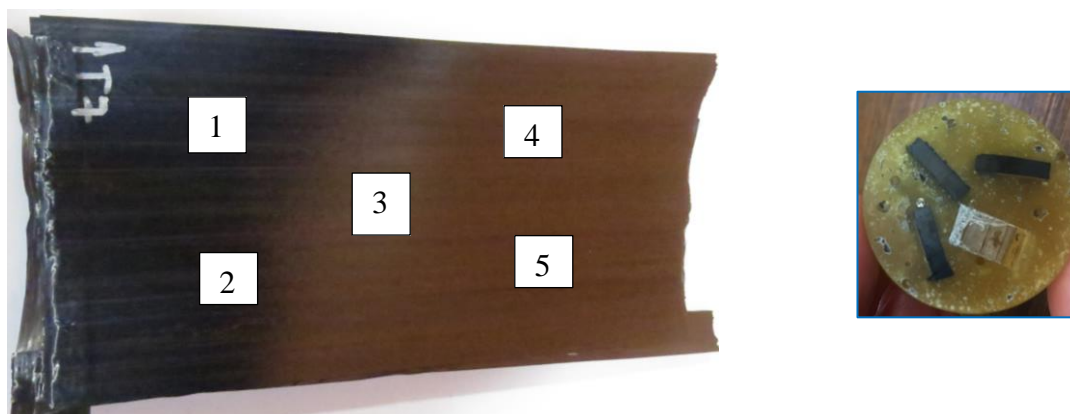
d – дебелина на испитуваната епрувета во mm.

6.6. Микроскопски анализи на примероци од добиените композитни плочи

6.6.1 Анализа со оптичка микроскопија

За испитување на микроструктурата на ламинатите добиени при одреден технолошки процес или за испитување на последиците како резултат на некое механичко оптоварување се користат најразлични видови на микроскопи. Оптичките микроскопи имаат најголема примена за да се определи интерламинарното поврзување на слоевите во ламинатот и за определување на волуменот на воздушни празнини во истите.

Во рамките на истражувањата на оваа докторска дисертација направени се снимки на попречни пресеци од добиените примероци на оптички микроскоп и анализирана е поврзаноста на слоевите и содржината на пори во ламинатот во корелација со добиените вредности за јакоста на свиткување односно јакоста на поврзувањето на слоевите. Од секоја добиена ламинатна плоча отсечени се по пет примероци од разни делови на ламинатот, потоа истите поставени се во калап од епоксидна смола и соодветно полирани и подготвени за понатамошно испитување (слика 6.11).



Слика 6.11. Места на ламинатна плоча од каде се отсечени примероци и подготвени примероци за снимање

Добиените снимки се анализирани и пресметана е содржина на пори за секој примерок со помош на софтвер за анализа на снимка Image J (NIH) [109]. Содржината на пори е многу важен параметар за карактеризација на квалитетот на композитниот производ. Таа може да биде определена и преку теоретската и експериментално добиената густина на ламинатните плочи, во согласност со равенката:

$$V_{void} = \frac{(\rho_{ct} - \rho_{ce})}{\rho_{ct}} \quad (6.14)$$

Каде: V_{void} е содржина на пори на ламинатот; ρ_{ct} е теоретска густина на ламинатот (kg/m^3); ρ_{ce} е експериментална густина на ламинатните плочи (kg/m^3). Експерименталната густина се определува според стандардот ASTM D792 [110].

6.6.2. Анализа со електронска микроскопија

Со цел да се анализираат промените подлабоко во структурата на ламинатните примероци, да се анализира интерламинарното поврзување и присуството на воздушни пори или деструкција на матрицата, направени се снимки на некои примероци за кои се забележа значајна промена при оптичката микроскопија. Попречните пресеци од тестираните примероци претходно се исполираа и се напарија со злато, а потоа истите се снимаа на скенирачки електронски микроскоп VEGA3 LMU од фирмата Tescan (слика 6.12). Електронските снимки се изработени во лабораторијата за електронска микроскопија при Универзитетот „Гоце Делчев“ – Штип.



Слика 6.12. Скенирачки електронски микроскоп VEGA3 LMU од фирмата Tescan

7. Анализа на резултатите

7.1. Добиени резултати за напрегање при свиткување на примероци ламинатни плочи LATL-UD1, LATL-UD2 и LATL-UD3 добиени со ATL постапка

За определување на напрегањето при свиткување на добиените примероци ламинатни плочи од 1 до 8 со ознаки LATL-UD1, LATL-UD2 и LATL-UD3 според условите на експериментите дадени во табела 6.4 и табела 6.5, отсечени се по пет тест епрувети за тестирање од секоја плоча односно од секоја комбинација. Димензиите на подготвените тест епрувети и добиените резултати од направените тестирањата за максималната сила при свиткување до кршење на епруветите, пресметаната јакост при свиткување и коефициентот на варијација, дадени се во табела 7.1; 7.2 и 7.3. Со оглед на тоа дека за секоја од осумте комбинации се направени по 5 тестирања (5 реплики), вкупно извршени се по 40 тестови поодделно за ламинатните плочи со ознаки LATL-UD1, LATL-UD2 и LATL-UD3. Од добиените вредности за сила прикажани во табелите 7.1; 7.2 и 7.3, се забележуваат одредени отстапувања на вредностите, а тоа се должи на различната дебелина на примероците. Потоа, напрегањето при свиткување е пресметано во согласност со равенката 6.13 според стандардот ASTM D790 [99]. Пресметаните вредности за напрегање при свиткувања се со дозволена дисперзија односно коефициент на варијација (CV) кој е помал од 10. Средната вредност од добиените напрегања при свиткување за сите осум комбинации од серија 1 до серија 8 за трите типови примероци ламинатни плочи со ознаки LATL-UD1, LATL-UD2 и LATL-UD3, се дадени во табела 7.4. Графички резултатите се претставени на слика 7.1.

Табела 7.1. Резултати за максимална сила при свиткување до кршење за примероците LATL-UD1

Ознака на примероците	Ширина b (mm)	Дебелина d (mm)	F (N)	σ (MPa)	CV	
Серија 1 LATL-UD1	1-1 (y_{j1})	15,00	1,50	878,20	975,77	6,04
	1-2 (y_{j2})	15,00	1,45	824,54	980,43	
	1-3 (y_{j3})	15,20	1,50	938,35	1028,89	
	1-4 (y_{j4})	15,30	1,50	1028,16	1120,00	
	1-5 (y_{j5})	14,91	1,50	964,59	1078,96	
Серија 2 LATL-UD1	2-1 (y_{j1})	15,26	1,55	1003,50	1026,43	6,24
	2-2 (y_{j2})	15,34	1,61	1013,23	955,57	
	2-3 (y_{j3})	15,40	1,57	944,26	932,83	
	2-4 (y_{j4})	14,81	1,65	927,64	862,76	
	2-5 (y_{j5})	15,33	1,62	998,90	931,07	
Серија 3 LATL-UD1	3-1 (y_{j1})	15,36	1,50	931,08	1010,29	5,79
	3-2 (y_{j2})	14,40	1,55	979,95	1062,21	
	3-3 (y_{j3})	15,32	1,55	909,90	927,05	
	3-4 (y_{j4})	15,40	1,55	974,58	987,78	
	3-5 (y_{j5})	14,89	1,55	1020,89	1070,17	
Серија 4 LATL-UD1	4-1 (y_{j1})	15,00	1,52	806,96	873,18	6,46
	4-2 (y_{j2})	15,00	1,55	925,84	963,41	
	4-3 (y_{j3})	15,20	1,55	987,77	1014,33	
	4-4 (y_{j4})	15,30	1,60	922,23	882,96	
	4-5 (y_{j5})	14,90	1,59	907,22	903,15	
Серија 5 LATL-UD1	5-1 (y_{j1})	15,10	1,20	503,95	869,12	6,94
	5-2 (y_{j2})	15,00	1,20	469,54	815,17	
	5-3 (y_{j3})	15,05	1,20	538,15	931,19	
	5-4 (y_{j4})	14,98	1,20	562,21	977,36	
	5-5 (y_{j5})	15,10	1,23	564,46	926,57	
Серија 6 LATL-UD1	6-1 (y_{j1})	14,89	1,24	478,63	783,96	7,67
	6-2 (y_{j2})	15,00	1,24	565,448	919,37	
	6-3 (y_{j3})	14,89	1,27	567,233	885,71	
	6-4 (y_{j4})	14,89	1,23	548,511	913,09	
	6-5 (y_{j5})	14,89	1,20	453,067	792,39	
Серија 7 LATL-UD1	7-1 (y_{j1})	15,10	1,50	768,00	847,68	7,53
	7-2 (y_{j2})	14,75	1,50	760,00	858,76	
	7-3 (y_{j3})	15,15	1,50	835,60	919,25	
	7-4 (y_{j4})	15,00	1,50	892,00	991,11	
	7-5 (y_{j5})	15,10	1,55	960,00	992,34	
Серија 8 LATL-UD1	8-1 (y_{j1})	15,24	1,25	585,67	922,32	4,94
	8-2 (y_{j2})	15,32	1,27	593,83	901,20	
	8-3 (y_{j3})	15,13	1,27	547,26	840,96	
	8-4 (y_{j4})	15,25	1,32	668,78	943,84	
	8-5 (y_{j5})	15,30	1,22	518,33	853,55	

Табела 7.2. Резултати за максимална сила при свиткување до кршење за примероците LATL-UD2

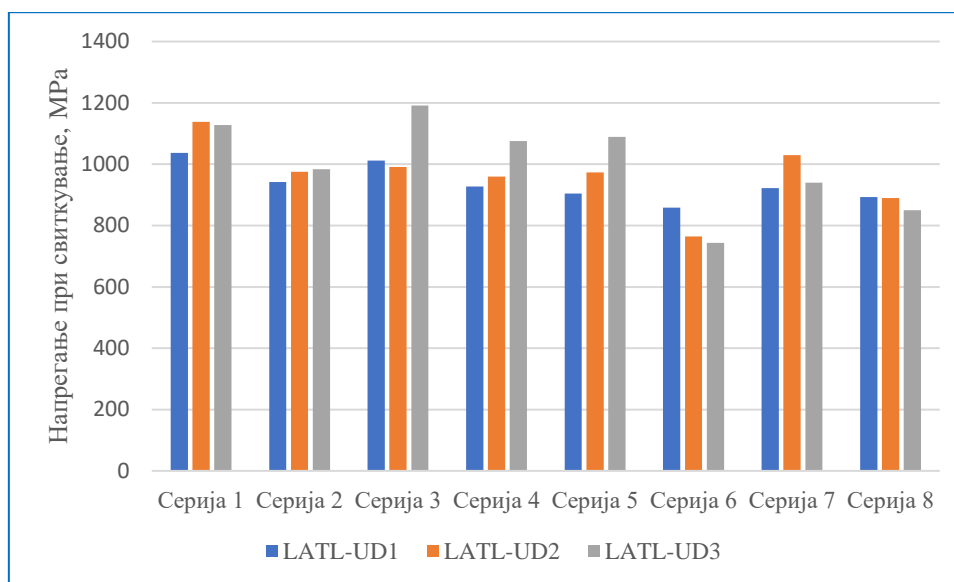
Ознака на примероците	Ширина b (mm)	Дебелина d (mm)	F (N)	σ (MPa)	CV	
Серија 1 LATL-UD2	1-1 (y_{j1})	15,20	1,59	1146,30	1118,70	9,8
	1-2 (y_{j2})	15,00	1,60	999,80	976,30	
	1-3 (y_{j3})	15,10	1,57	1121,40	1129,80	
	1-4 (y_{j4})	14,95	1,58	1178,70	1184,30	
	1-5 (y_{j5})	14,85	1,52	1174,90	1284,20	
Серија 2 LATL-UD2	2-1 (y_{j1})	15,06	1,56	968,21	990,66	9,1
	2-2 (y_{j2})	14,97	1,30	616,74	914,16	
	2-3 (y_{j3})	15,00	1,47	710,96	822,52	
	2-4 (y_{j4})	14,98	1,66	1196,97	1087,40	
	2-5 (y_{j5})	14,70	1,66	1146,33	1061,23	
Серија 3 LATL-UD2	3-1 (y_{j1})	15,19	1,55	929,10	954,70	8,1
	3-2 (y_{j2})	14,90	1,55	973,00	1019,30	
	3-3 (y_{j3})	14,95	1,65	1112,00	1024,50	
	3-4 (y_{j4})	15,07	1,67	978,00	872,60	
	3-5 (y_{j5})	15,03	1,65	1181,00	1082,30	
Серија 4 LATL-UD2	4-1 (y_{j1})	15,37	1,57	830,20	821,70	9,1
	4-2 (y_{j2})	15,05	1,52	1008,20	1087,30	
	4-3 (y_{j3})	15,34	1,55	929,10	945,40	
	4-4 (y_{j4})	15,23	1,52	884,00	942,10	
	4-5 (y_{j5})	14,80	1,60	1012,80	1002,40	
Серија 5 LATL-UD2	5-1 (y_{j1})	15,28	1,67	1174,96	1033,95	7,6
	5-2 (y_{j2})	15,35	1,69	1115,88	954,48	
	5-3 (y_{j3})	15,23	1,72	1099,92	915,45	
	5-4 (y_{j4})	15,24	1,74	1102,88	896,35	
	5-5 (y_{j5})	14,98	1,73	1275,54	1066,89	
Серија 6 LATL-UD2	6-1 (y_{j1})	14,15	1,52	596,31	684,00	9,3
	6-2 (y_{j2})	15,20	1,66	988,90	885,37	
	6-3 (y_{j3})	15,20	1,63	762,57	708,09	
	6-4 (y_{j4})	15,30	1,66	849,29	755,40	
	6-5 (y_{j5})	15,18	1,62	836,35	787,26	
Серија 7 LATL-UD2	7-1 (y_{j1})	15,29	1,55	1135,91	1159,59	9,7
	7-2 (y_{j2})	15,17	1,45	729,29	857,46	
	7-3 (y_{j3})	15,25	1,58	1050,61	1034,88	
	7-4 (y_{j4})	15,15	1,46	882,86	1025,20	
	7-5 (y_{j5})	15,28	1,66	1202,69	1071,14	
Серија 8 LATL-UD2	8-1 (y_{j1})	14,85	1,69	952,383	842,06	9,7
	8-2 (y_{j2})	15,22	1,67	1167,73	1031,63	
	8-3 (y_{j3})	15,14	1,65	874,19	795,32	
	8-4 (y_{j4})	15,20	1,65	924,72	837,97	
	8-5 (y_{j5})	15,25	1,73	1144,32	940,19	

Табела 7.3. Резултати за максимална сила при свиткување до кршење за примероците
LATL-UD3

Ознака на примероците	Ширина b (mm)	Дебелина d (mm)	F (N)	σ (MPa)	CV	
Серија 1 LATL-UD3	1-1 (y_{j1})	14,63	1,35	886,60	1246,94	7,77
	1-2 (y_{j2})	14,83	1,35	712,70	988,85	
	1-3 (y_{j3})	14,76	1,40	842,20	1091,70	
	1-4 (y_{j4})	14,58	1,30	775,00	1179,48	
	1-5 (y_{j5})	15,18	1,30	775,00	1132,86	
Серија 2 LATL-UD3	2-1 (y_{j1})	14,73	1,22	567,40	970,51	2,99
	2-2 (y_{j2})	14,75	1,23	535,80	900,39	
	2-3 (y_{j3})	14,58	1,21	523,58	919,78	
	2-4 (y_{j4})	14,58	1,18	519,22	959,10	
	2-5 (y_{j5})	14,98	1,20	546,13	949,41	
Серија 3 LATL-UD3	3-1 (y_{j1})	14,89	1,34	581,90	816,16	2,50
	3-2 (y_{j2})	14,85	1,37	631,00	848,97	
	3-3 (y_{j3})	14,74	1,34	614,40	870,51	
	3-4 (y_{j4})	15,08	1,33	607,51	854,04	
	3-5 (y_{j5})	15,20	1,30	588,68	859,37	
Серија 4 LATL-UD3	4-1 (y_{j1})	14,16	1,26	389,70	650,07	9,12
	4-2 (y_{j2})	14,12	1,33	483,80	726,37	
	4-3 (y_{j3})	15,10	1,35	589,30	803,01	
	4-4 (y_{j4})	14,61	1,32	529,00	779,27	
	4-5 (y_{j5})	15,29	1,35	563,23	757,96	
Серија 5 LATL-UD3	5-1 (y_{j1})	14,60	1,04	466,10	1106,86	6,03
	5-2 (y_{j2})	14,72	1,10	479,30	1009,13	
	5-3 (y_{j3})	15,04	1,16	600,03	1111,84	
	5-4 (y_{j4})	15,14	1,17	574,52	1039,53	
	5-5 (y_{j5})	15,09	1,17	649,54	1179,17	
Серија 6 LATL-UD3	6-1 (y_{j1})	14,88	1,14	523,40	1014,97	8,95
	6-2 (y_{j2})	14,78	1,18	536,20	977,06	
	6-3 (y_{j3})	14,78	1,15	583,56	1119,56	
	6-4 (y_{j4})	14,79	1,16	490,31	923,88	
	6-5 (y_{j5})	14,89	1,15	464,10	883,79	
Серија 7 LATL-UD3	7-1 (y_{j1})	14,81	1,09	566,80	1207,96	7,20
	7-2 (y_{j2})	14,68	1,12	600,00	1221,86	
	7-3 (y_{j3})	14,82	1,16	553,30	1040,47	
	7-4 (y_{j4})	15,10	1,14	640,02	1223,00	
	7-5 (y_{j5})	15,00	1,14	657,23	1264,30	
Серија 8 LATL-UD3	8-1 (y_{j1})	14,70	1,17	514,80	959,36	8,80
	8-2 (y_{j2})	14,63	1,12	556,30	1136,74	
	8-3 (y_{j3})	14,83	1,18	531,70	965,59	
	8-4 (y_{j4})	15,10	1,15	613,212	1151,51	
	8-5 (y_{j5})	15,25	1,73	1144,32	1164,26	

Табела 7.4. Резултати добиени за средни вредности за напрегање при свиткување за примероци LATL-UD1, LATL-UD2, LATL-UD3

Напрегање при свиткување $\sigma_{sr.}$ (MPa)		LATL-UD1	LATL-UD2	LATL-UD3
	Серија 1	1036,81	1138,67	1127,96
Серија 2	941,73	975,20	983,85	
Серија 3	1011,50	990,69	1191,52	
Серија 4	927,41	959,78	1075,49	
Серија 5	903,88	973,42	1089,30	
Серија 6	858,90	764,03	743,34	
Серија 7	921,83	1029,65	939,84	
Серија 8	892,37	889,44	849,81	



Слика 7.1. Резултати за напрегање при свиткување за сите серии на примероци LATL-UD1, LATL-UD2, LATL-UD3

Добиените резултати покажуваат дека напрегањето при свиткување кај сите примероци е во граници од 800 до 1200 МПа. Промената на условите на процесирање прави промена во механичките карактеристики на ламинатните плочи, а тоа е резултат на степенот на добро постигнат интимен контакт и поврзување на слоевите во ламинатот. Примероците добиени со осум различни услови со промена на три фактори при процесирање на две ниво покажаа различни механички карактеристики со најголемо отстапување од околу 30 % од максималната вредност. Карактеристично е тоа што кај

трите типови ламинатни плочи со ознаки LATL-UD1, LATL-UD2, LATL-UD3 добиени се максимални и минимални вредности за напрегање при свиткување за иста серија на примероци. Тоа јасно го покажува доминантното влијание на одредени фактори при автоматизираното полагање на ленти, а кое во продолжение е анализирано и дискутирано за секој тип на примероци поодделно.

7.2. Добивање на регресиони равенки за модел од прв ред за примероците добиени со ATL постапка

7.2.1. Добивање на регресиона равенка за примероци LATL-UD1

Бидејќи секој од осумте експерименти е реплициран, определена е дисперзијата на резултатите според равенката (6.2).

За првиот експеримент одзивите се: 975,77; 980,43; 1028,43; 1120,00 и 1078,96, а нивната средна вредност 1036,81, па варијансата односно дисперзијата ќе биде:

$$S_j^2 = \frac{1}{5-1} \sum_{j=1}^5 ((975,77 - 1036,81)^2 + (980,42 - 1036,81)^2 + (1028,89 - 1036,81)^2 + (1120,00 - 1036,81)^2 + (1078,96 - 1036,81)^2) = 3916,11$$

На овој начин пресметана е дисперзијата и за останатите тестови од секоја серија поодделно. Потоа, определена е средната вредност на дисперзијата, според равенката (6.3).

Резултатите од пресметаната средна вредност за одзивната функција т.е. напрегањето на свиткување и определената дисперзија за секоја серија добиени резултати заедно со средната вредност на дисперзијата за примероците ламинатни плочи со ознака LATL-UD1, дадени се во табела 7.5.

За проценка на дисперзијата се примени Кохреновиот критериум, равенка (6.4).

Најголемата дисперзија ($\max S_j^2$) изнесува 19254,82, а G_p добиено е дека изнесува 0,24562804. G_p претставува пресметана вредност на Критериумот на Кохерен и таа вредност се споредува со табеларната вредност на Кохерен, $G_{\alpha,f,N}$, во зависност од нивото на значајност α , бројот на степени на слобода, f ($f = k-1$) и бројот на опити N . Табелата за критериумот на Кохрен е дадена во Прилог 1.

Нивото на значајност најчесто во пресметките се зема за 0,05 што значи дека во нашите пресметки допуштаме само 5 % грешка или сметаме дека добиените резултати се пресметани со точност од 95%. Редот на дисперзија се смета за хомоген ако е исполнет условот (6.5). Според критични вредности за горно 0,05 ниво на значајност или $P = 0,95$, Кохренов критериум е $G_{\alpha, f, N} = 0,3912$, што значи дека е исполнет горенаведениот услов.

Исполнувањето на горенаведениот услов укажува на репродуцибилност на експериментите, а проценката за дисперзијата на резултатите од тестирањата е дека таа е хомогена.

После пресметките за дисперзијата на експериментите, врз основа на полниот факторен експериментлен дизајн, се пресметаа регресионите коефициенти: $(\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}, \beta_{123},)$. Определувањето на значјноста на регресионите коефициенти се направи со помош на Студентовиот (Student) критериум. За да се утврди дали тие се значајни или не, треба да се процени варијансата при која тие се определуваат, според равенката (6.6). Според пресметката по таа равенка (6.6), S_β изнесува 15,650.

Табела 7.5. Резултатите од пресметаната дисперзија за секоја серија добиени резултати за LATL-UD1

N	y_{j1}	y_{j2}	y_{j3}	y_{j4}	y_{j5}	$\sigma, \text{ (MPa)}$ \bar{y}	S_j^2
1	975,77	980,43	1028,89	1120,00	1078,96	1036,81	3916,11
2	1026,43	955,57	932,83	862,76	931,07	941,73	13795,70
3	1010,29	1062,21	927,05	987,78	1070,17	1011,50	13709,17
4	837,18	963,41	1014,33	882,96	903,15	927,41	14355,64
5	869,12	815,17	931,19	977,36	926,56	903,88	3934,51
6	783,96	919,37	885,71	913,09	792,39	858,90	17352,05
7	847,68	858,76	919,25	991,11	992,34	921,83	19254,82
8	922,32	901,20	840,96	943,84	853,55	892,37	7773,27
						$\sum_{N=1}^8 S_j^2$	78390,14
						S_{jsr}^2	9798,77

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: апсолутната вредност на коефициентот на регресија да е поголем во однос на табличната вредност на Студентовиот критериум, равенка (6.7). Во таа равенка t е табеларна вредност на Студентовиот (Student) критериум која за $P = 0,95$ и $f = 32$, изнесува $t = 1,96$. Во Прилог 2 се дадени табеларните вредности за Студентовиот критериум. Вредноста на степените на слобода f одредена е од релацијата:

$$f = N(k-1) = 8(5-1) = 32$$

каде што N е бројот на експерименти на различни услови, а k е бројот на повторувања на секој од експериментите. Кога критериумот не е задоволен, тогаш коефициентот на регресија влијае малку на одзивот на функцијата. Во одредени случаи може и да се изостави како незначаен т.е. невлијателен коефициент во регресионата равенка.

За нашиот експеримент :

$$|\beta| \geq S_{\beta}t \geq 15,65 \cdot 1,96 \geq 30,67$$

што значи, секој коефициент по апсолутна вредност треба да биде поголем од или еднаков на 30,67.

Коефициентот β_0 претставува средна вредност од сите одзиви (\bar{y}) и изнесува 936,80.

Останатите коефициенти од равенката се пресметуваат преку равенките (6.8).

Во табела 7.6 се дадени пресметаните вредности на коефициентите β_i од каде што може да се забележи дека коефициентите: $\beta_2, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}, \beta_{123}$ по апсолутна вредност се помали од 30,67. Тоа значи дека факторите пред кои се овие коефициенти влијаат малку врз напрегањето при свиткување на ламинатните плочи.

Според тоа регресионата равенка со кодирани променливи ќе биде:

$$y = 936,80 + 31,70x_1 - 1,47x_2 + 42,56x_3 + 3,31x_1x_2 + 13,09x_1x_3 + 11,38x_2x_3 - 0,57x_1x_2x_3 \quad (7.1)$$

Од регресионата равенка може да се забележи дека температурата на ласерот како процесен параметар X_1 и притисокот на валјачето како процесен параметар X_3 значајно влијаат врз напрегањето при свиткување на примероците ламинатни плочи. Исто така, постои интеракција меѓу температурата и притисокот на валјачето како и интеракција меѓу аголот на поставеност на ласер и притисокот на валјачето кои имаат приближно исто влијание врз напрегањето при свиткување. Помало е влијанието на интеракцијата меѓу факторите: температура на процесирање и агол на поставување на ласерот. Аголот на поставување на ласерот како втор фактор влијае обратно пропорционално врз одзивот.

Според тоа, пожелен е помал агол на поставување на ласерот за постигнување на добар ефект на поврзување на слоевите во точката каде валјачето притиска односно во *nir* точката на поврзување. Исто така, постои интеракција меѓу трите фактори која влијае со мала значајност и обратно пропорционално врз напрегањето при свиткување на примероците.

Табела 7.6. Резултати од пресметките на вредностите на коефициентите, β_i

N	x_0	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}	\bar{y}
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1036,81
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	941,73
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1011,50
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	927,41
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	903,88
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	858,90
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	921,83
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	892,37

β	β_0	β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}	β_{23}	β_{123}
	936,80	31,70	-1,47	42,56	3,31	13,09	11,38	-0,57

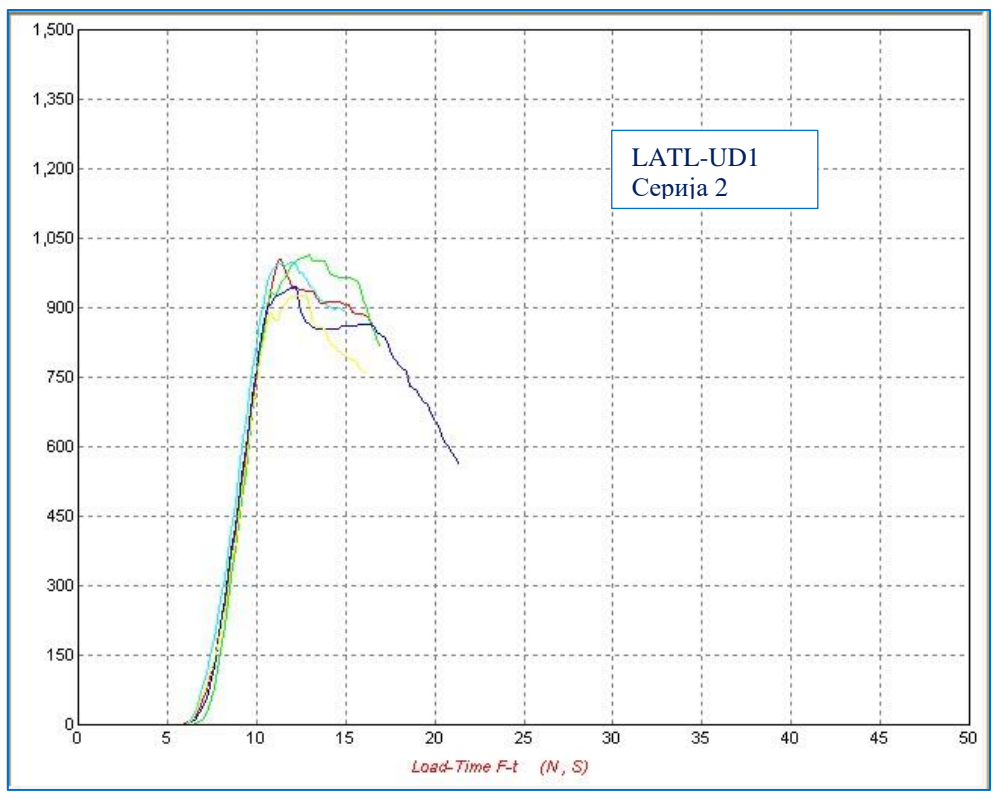
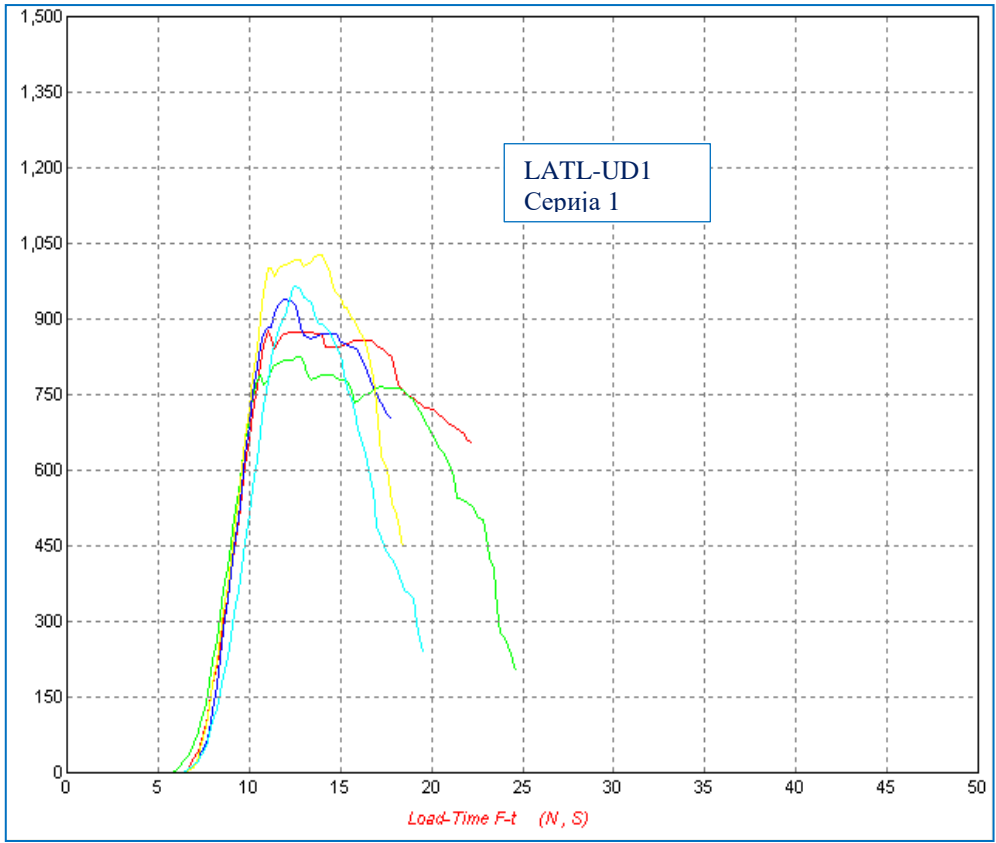
После определување на регресионата равенка се проверува нејзината адекватност со помош на критериумот на Фишер (Fisher), согласно равенките (6.10), (6.11), (6.12).

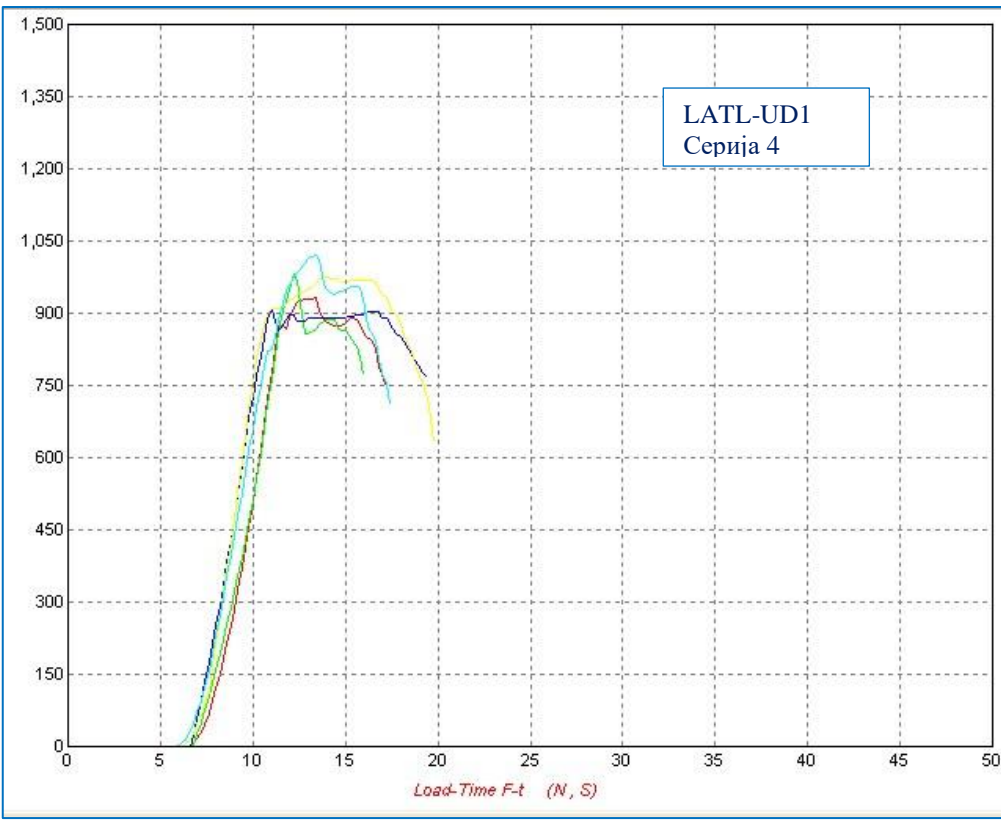
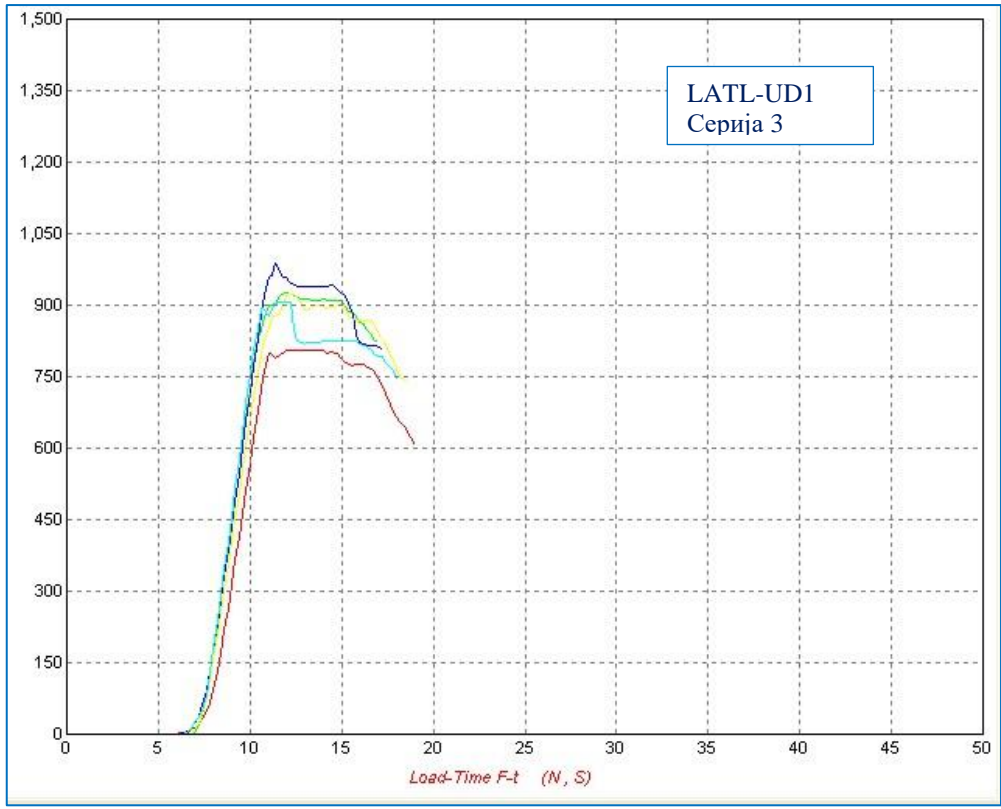
Во табела 7.7 дадени се вредностите добиени од експериментот \bar{y}_j и вредностите добиени од моделот y_j . Врз основа на пресметката за разликите меѓу пресметаните вредности според добиениот модел и експериментално добиените вредности за напрегањето при свиткување добиено е дека F_p е 0,26. Табеларната вредност на Фишеровиот критериум за $P = 0,95$, $f = (k-1) = 5 - 1 = 4$ и $N=8 \times (5-1) = 32$ изнесува 2,69, и бидејќи е задоволен условот даден со равенка (6.10) добиено е дека моделот е адекватен и може да се користи.

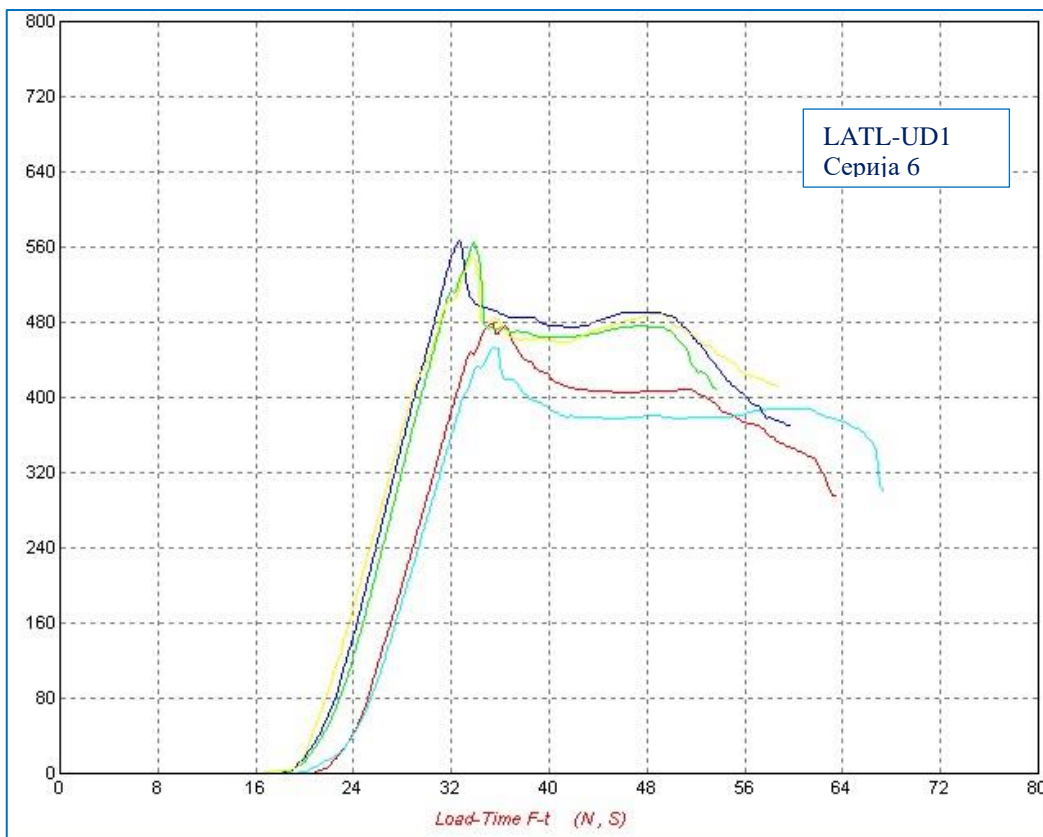
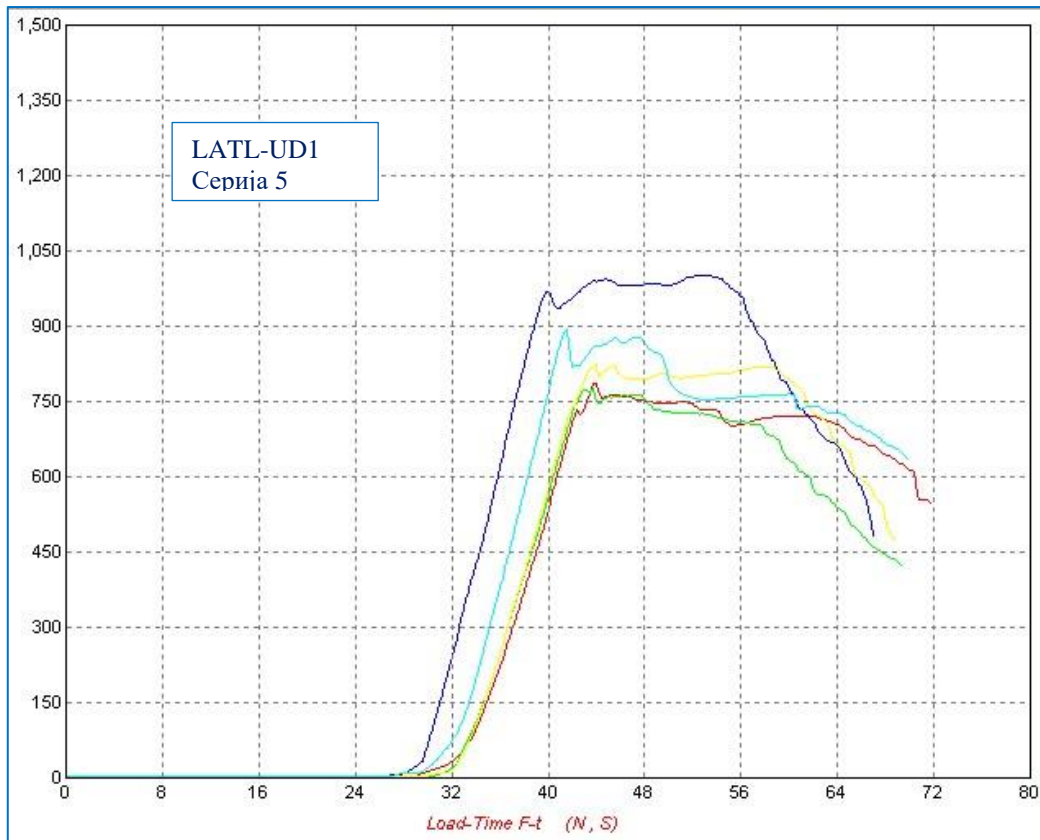
Табела 7.7. Пресметка на разликите меѓу пресметаните и експериментално добиените вредности за примероците LATL-UD1

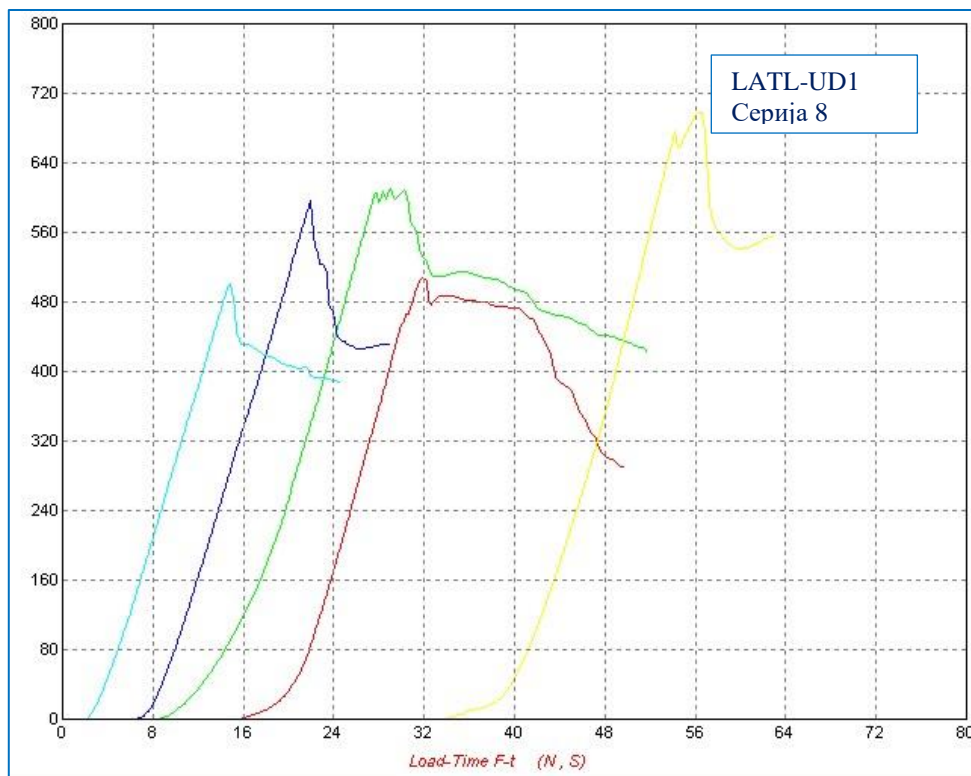
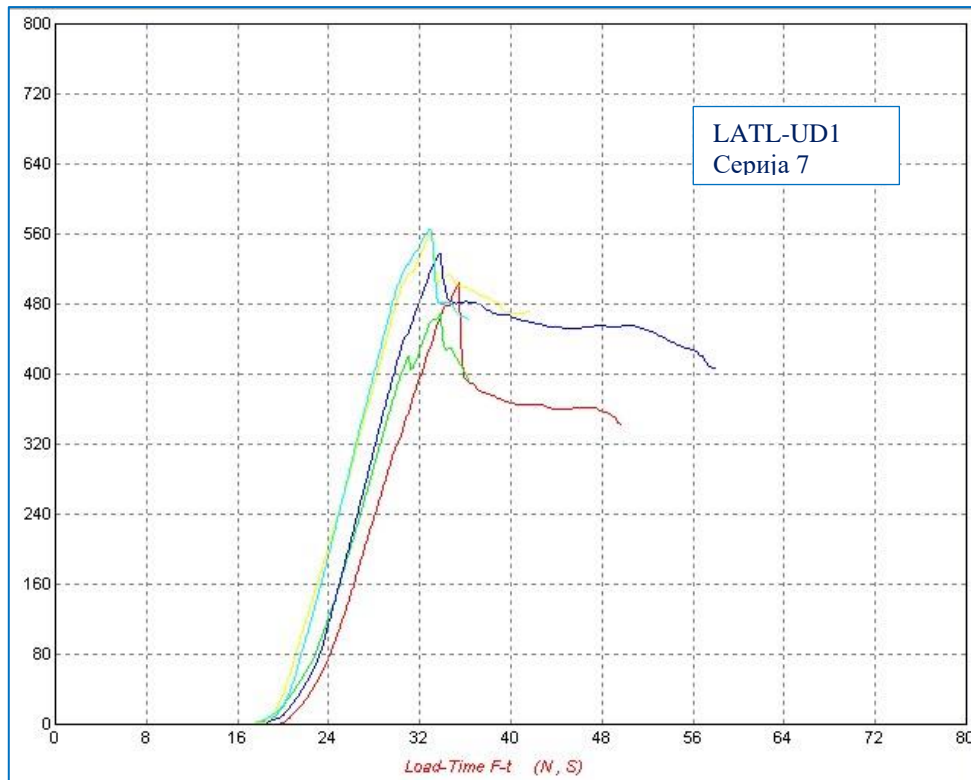
N	\bar{y}	y_p	$(\bar{y} - y_p)$	$(\bar{y} - y_p)^2$
1	1036,81	1011,06	25,75	662,89
2	941,73	947,66	-5,93	35,15
3	1011,50	1011,06	0,44	0,19
4	927,41	947,66	-20,25	410,26
5	903,88	925,95	-22,06	486,87
6	858,90	862,55	-3,64	13,28
7	921,83	925,95	-4,12	16,96
8	892,37	862,55	29,83	889,76
$\sum_{j=1}^N (\bar{y} - y_p)^2 =$				2515,37

На слика 7.2 дадени се добиените криви сила – време од универзалната машина за тестирање за сите осум типови тестирани ламинатни плочи со ознаки LATL UD1, добиени при различни услови според план матрицата на експериментот. На секој дијаграм прикажани се по пет криви добиени од серијата тестирања на епрувети од секоја од осумте типови ламинатни плочи. Тоа се всушност пет повторувања на тестирањето што се направени на тест епрувети од една иста ламинатна плоча, за поточно определување на реалната вредност на напрегањето при свиткување. Секоја серијата претставува тестирање на пет епрувети отсечени од различни области на произведените ламинатни плочи, а дисперзијата на резултатите е проверена со моделот и покажано е дека таа е хомогена односно сите добиени резултати од сите тестирања се земаат при определување на средната вредност на напрегањето при свиткување.



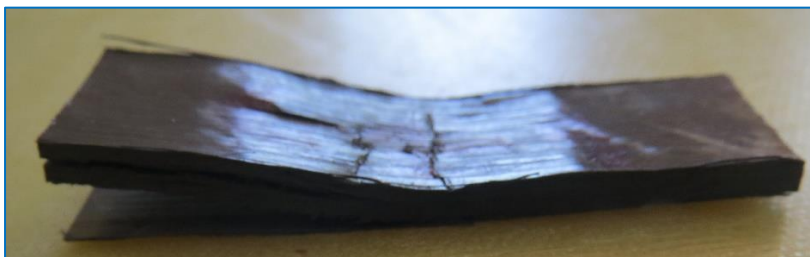






Слика 7.2. Добиени криви сила – време ($N, sek.$) од тестирање на ламинатните плочи LATL UD1 од серија 1 до серија 8

Добиените криви за примероците од серија 1 до серија 6 имаат сличен изглед и може да се забележи дека ламинатните примероци имаат линеарно однесување се до кршење на некој од слоевите во примерокот. Потоа, кривите добиваат зик – зак изглед на повисоки вредности од приложената сила што одговара на пукање на слоевите во ламинатот. На x-оската дадено е времето на тестирање до кршење на примероците. Може да се забележи дека кривите имаат различен почеток на мерење на времето, а тоа се должи на времето додека делот од алатот со кој се притиска не дојде до епруветата која се тестира и да врши притисок на свиткување на истата. Од тој момент се регистрира времето, а за почеток се зема времето кога кривата почнува да се движи нагоре во однос на применетата сила. Кривите од серија 1 до серија 6 го имаат истиот изглед, само што вредностите на максималната сила до кршење на примероците се различни. Кај примероците од серија 6 до серија 8 кривите имаат малку поразличен изглед односно има линеарно однесување до кршење на некој од слоевите во ламинатот, а потоа се појавува пик, меѓутоа примероците сеуште не се комплетно скршени односно сеуште даваат отпор на приложената сила на свиткување. Со континуирано зголемување на силата на свиткување на примероците, кривите продолжуваат да имаат линеарен изглед се до нивно кршење. Кај овие примероци после ослабување на некој од слоевите, примерокот со намалена дебелина дава отпор на приложената сила, а потоа после извесно време сите преостанати слоеви се кршат заедно. Тоа јасно може да се виде од слика 7.3. каде е даден примерокот после негово тестирање.



Слика 7.3. Изглед на примерок LATL UD1 серија 6 после тестирање

Добиените резултати од тестирањата на примероците го покажуваат влијанието на компакциониот притисок на валјачето и температурата на ласерот врз напрегањето при свиткување на ламинатните плочи. Имено, повисокиот компакционен притисок на

валјаче во комбинација со повисока температура на процесирање при процесирање на примероците резултира во добивање ламинатни плочи со повисоки вредности за напрегање при свиткување. Кај ламинатите секој слој има свој удел во неговата вкупна јакост и кога еден од слоевите во структурата ослабува, пука или се крши условува кршење на полимерната матрица околу него, а потоа се појавува зголемување на напрегањето. Одговорот на напрегањето на ламинатот е обновен, но дебелината на носење на товарот е намалена како резултат на откажување на еден од слоевите. Како се намалува дебелината на примерокот, тој нема да може да ја издржи приложената сила на свиткување и на крај ќе се скрши.

Изборот на брзината на полагање на препрег лентите зависи од типот на оптиката која се користи. За истражувањата во оваа докторска дисертација користен е тип на оптика која дозволува примена на брзина од 5 m/min до 12 m/min. Според литературни истражувања брзини со кои може да се полагаат лентите се од 3 m/min до 48 m/min, но како најчесто применувани со кои се добиваат добри резултати се 4,5 mm/min, 6 m/min, 7,5 mm/min, 9 m/min, 12 m/min и 18 m/min [111, 112]. Доколку се применува поголема брзина, потребно е да се примени и повисока температура на процесирање за да дојде до поврзување на слоевите, во спротивно нема да настане добра врска меѓу нив. При помала брзина, температурата на ласер не може да биде повисока затоа што може да настане течење на полимерната матрица или деструкција на нејзината структура, а тоа ќе резултира во ламинат со слабо поврзување меѓу слоевите, а со тоа и слаби механички карактеристики. Тоа покажува дека кога факторот брзина се менува, температурата на ласерот не може да биде менувана во определен опсег. Затоа, брзината на полагање во истражувањата на овој докторски труд е земена за постојана односно применета е брзина од 9 m/min како средина од брзините кои можат да се применат со користениот тип на оптика. Со помала брзина може да се добиваат исто така добри ламинатни плочи, но во тој случај процесот ќе биде недоволно продуктивен, додека пак, поголема брзина од 9 m/min може да доведе до добивање на ламинатни плочи со повеќе дефекти, а со тоа послаби механички карактеристики. Ова ќе биде едно од потенцијалните подрачја на истражување на роботизираните AFP/ATL постапки за добивање на термопластични композити.

7.2.2. Добивање на регресиона равенка за примероци LATL-UD2

Резултатите од пресметаната средна вредност за јачината на свиткување и определената дисперзија според равенката (6.2) за секоја серија добиени резултати заедно со средната вредност на дисперзијата, равенка (6.3), за примероците ламинатни плочи со ознака LATL-UD2, дадени се во табела 7.8.

Табела 7.8. Резултатите од експериментите за примероци со ознака LATL-UD2

N	y_{j1}	y_{j2}	y_{j3}	y_{j4}	y_{j5}	$\sigma, \text{ (MPa)}$ \bar{y}	S_j^2
1	1118,66	976,34	1129,85	1184,31	1284,20	1138,67	12522,40
2	990,66	914,16	822,52	1087,40	1061,23	975,20	47264,00
3	954,72	1019,28	1024,54	872,62	1082,32	990,69	25593,43
4	821,73	1087,31	945,38	942,10	1002,39	959,78	37658,48
5	1033,95	954,48	915,45	896,35	1066,89	973,42	5514,90
6	684,00	885,37	708,09	755,40	787,26	764,03	24870,07
7	1159,59	857,46	1034,88	1025,20	1071,14	1029,65	48302,27
8	842,06	1031,63	795,32	837,97	940,19	889,44	36549,96
$\sum_{N=1}^8 S_j^2$							202197,91
$S_{jsr.}^2$							25274,74
S_{β}^2							631,87
$ \beta_i $							49,20

За проценка на дисперзијата според Кохреновиот критериум, равенка (6.4), добиено е дека G_p изнесува 0,24. За ниво на значајност 0,05, број на степени на слобода $f = 4$ и број на опити $n = 5$ табеларната вредност на Кохрен, $G_{\alpha,f,N}$ изнесува 0,39. Бидејќи е исполнет условот: пресметаната вредност да е помала или еднаква на табеларната вредност на Кохрен, проценката за дисперзијата на резултатите од тестирањата е дека таа е хомогена.

Во табела 7.9 дадени се пресметаните вредности на коефициентите β_i според равенка (6.8). Потоа, определена е значјноста на регресионите коефициенти со помош на Студентовиот (Student) критериум и добиено е дека секој коефициент по апсолутна вредност треба да биде поголем од или еднаков на 49,20 (табела 7.8). Тоа значи дека

факторите пред кои стои коефициент поголем од или еднаков на 49,20 имаат големо влијание врз напрегањето при свиткување на ламинатните плочи.

Табела 7.9. Резултати од пресметките на вредностите на коефициентите, β_i

N	x_0	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}	\bar{y}
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1138,67
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	975,20
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	990,69
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	959,78
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	973,42
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	764,03
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1029,65
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	889,44

β	β_0	β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}	β_{23}	β_{123}
	965,11	68,00	-2,28	50,98	25,22	-19,40	43,13	7,92

Според тоа регресионата равенка со кодирани променливи ќе биде:

$$y = 965,11 + 68,00x_1 - 2,28x_2 + 50,98x_3 + 25,22x_1x_2 - 19,40x_1x_3 + 43,13x_2x_3 + 7,92x_1x_2x_3 \quad (7.2)$$

Добиената регресиона равенка за процесот на полагање на препрег лента UD1 има сличен опис на влијанието на факторите во процесот како добиената равенка (7.1) за полагање на UD2 лента. Од добиената регресиона равенка може да се забележи дека најголемо влијание врз напрегањето на ламинатните плочи LATL-UD2 при свиткување имаат процесните фактори X_1 и X_3 односно температурата на ласер и притисокот на валјачето. Влијанието на вториот процесен фактор X_2 е многу мало и обратно пропорционало врз јакоста на ламинатните плочи. Тоа значи дека при повисоки температури на ласер и повисок применет притисок на валјаче пожелно е аголот на поставување на ласерот да е помал. Според добиената регресиона равенка може да се забележи дека има интеракција меѓу факторите, а како најзначајна е интеракцијата меѓу факторите: агол на поставување на ласер и притисок на валјаче. Интеракцијата на процесниот фактор температура на процесирање со притисокот на валјачето влијае обратнопропорционално врз напрегањето при свиткување на ламинатните плочи. Тоа значи дека најдобри резултати за напрегање при свиткување ламинатните плочи ќе се добијаат кога двата фактори се на горно ниво, а најслаби кога се на долно ниво.

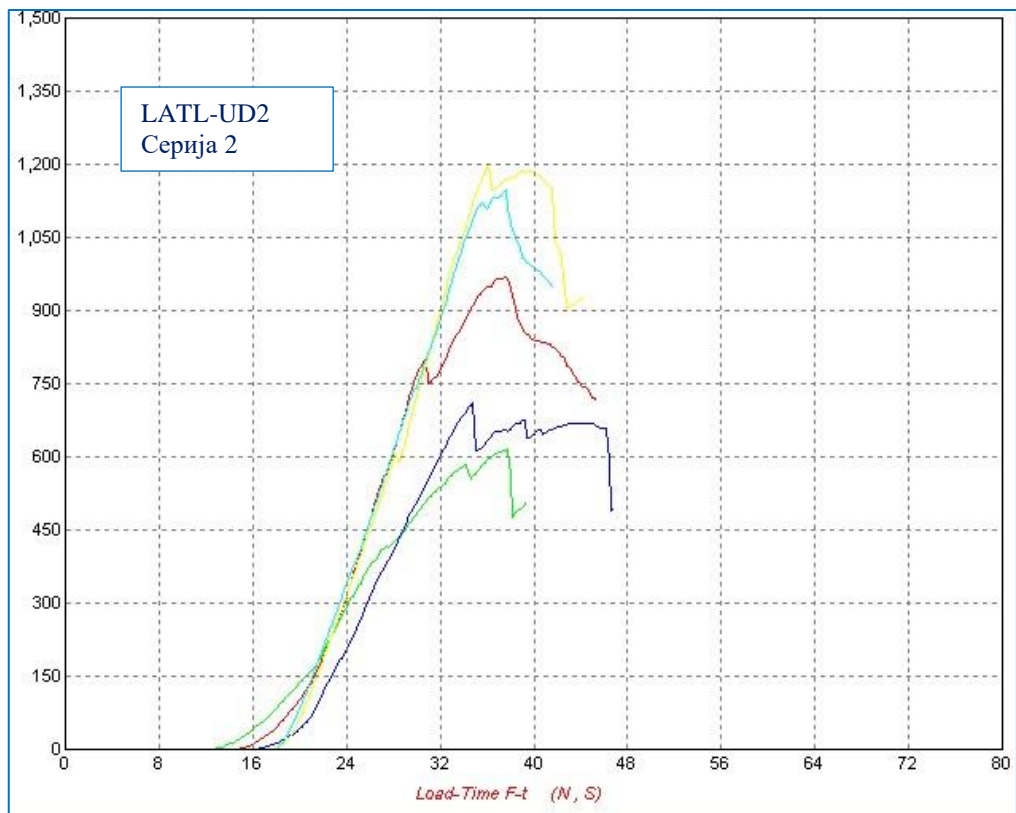
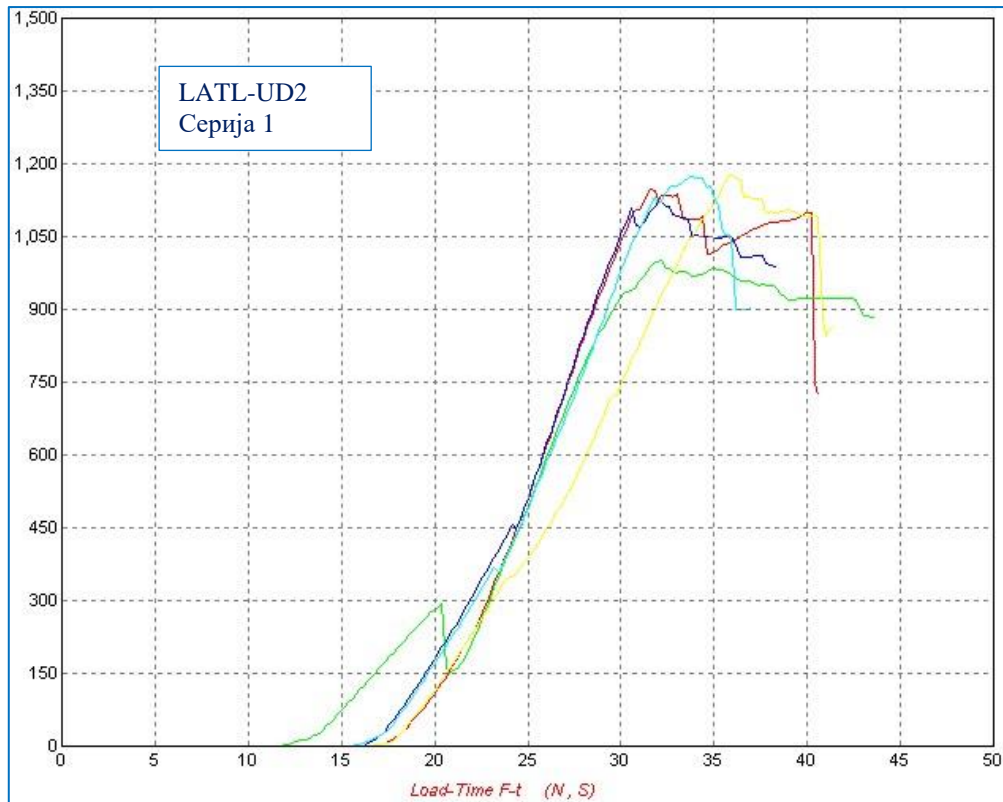
Добиените експериментални резултати го потврдуваат тоа. Интеракцијата меѓу трите фактори влијае со мала значајност врз јакоста при свиткување на примероците.

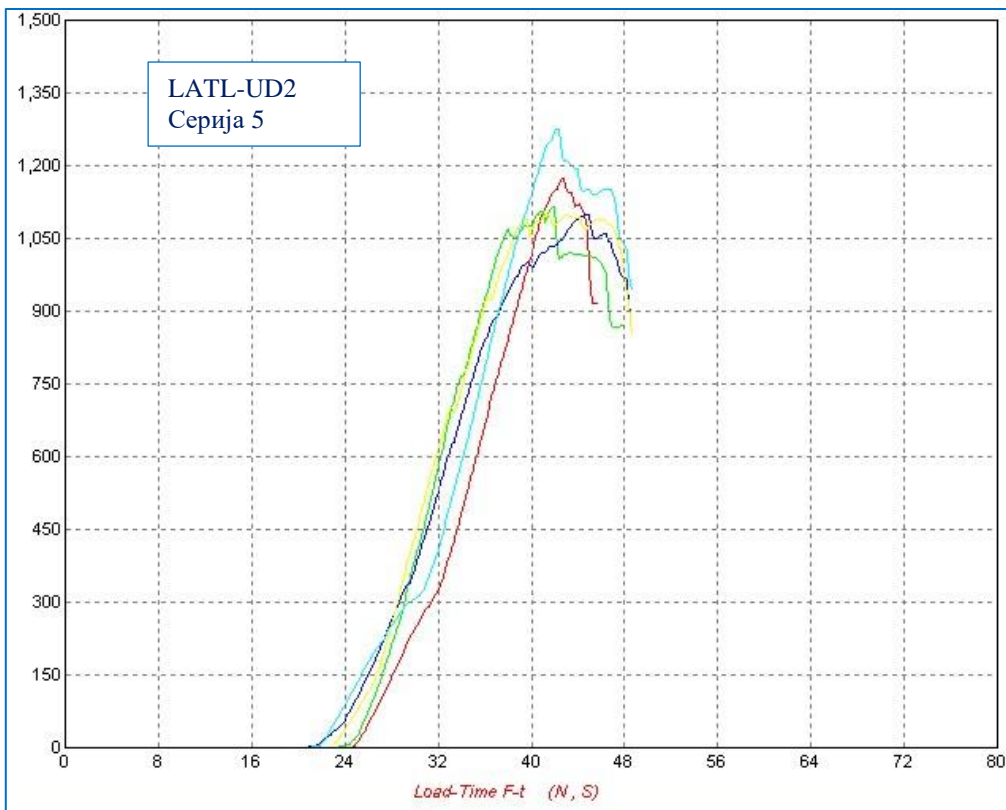
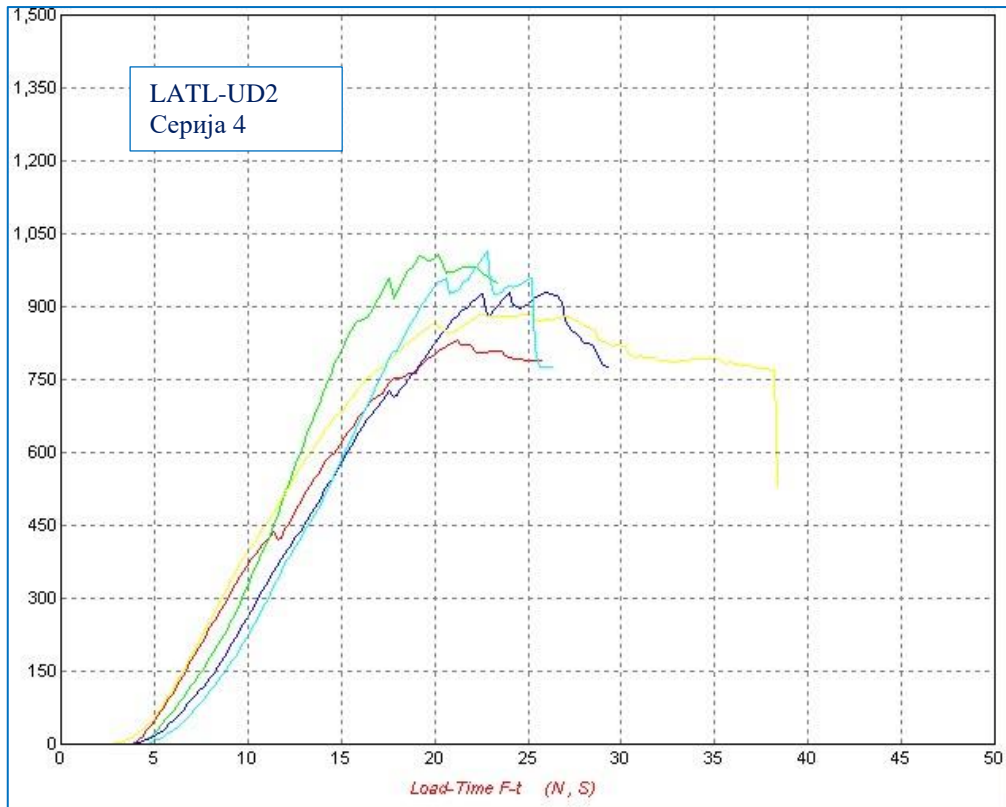
Определена е адекватноста на моделот со помош на критериумот на Фишер, според равенките (6.10) до (6.12). Во табела 7.10 дадени се вредностите добиени од експериментот \bar{y}_j и вредностите добиени од моделот y_j . Врз основа на пресметката за разликите меѓу пресметаните вредности според добиениот модел и експериментално добиените вредности за напрегање при свиткување, добиено е дека F_p е 0,93. Табеларната вредност на Фишеровиот критериум за $P = 0,95$, $f = (n-1) = 5 - 1 = 4$ и $N=8 \times (5-1) = 32$ изнесува 2,69, и бидејќи е задоволен условот даден со равенка (7.9) добиено е дека моделот е адекватен и може да се користи.

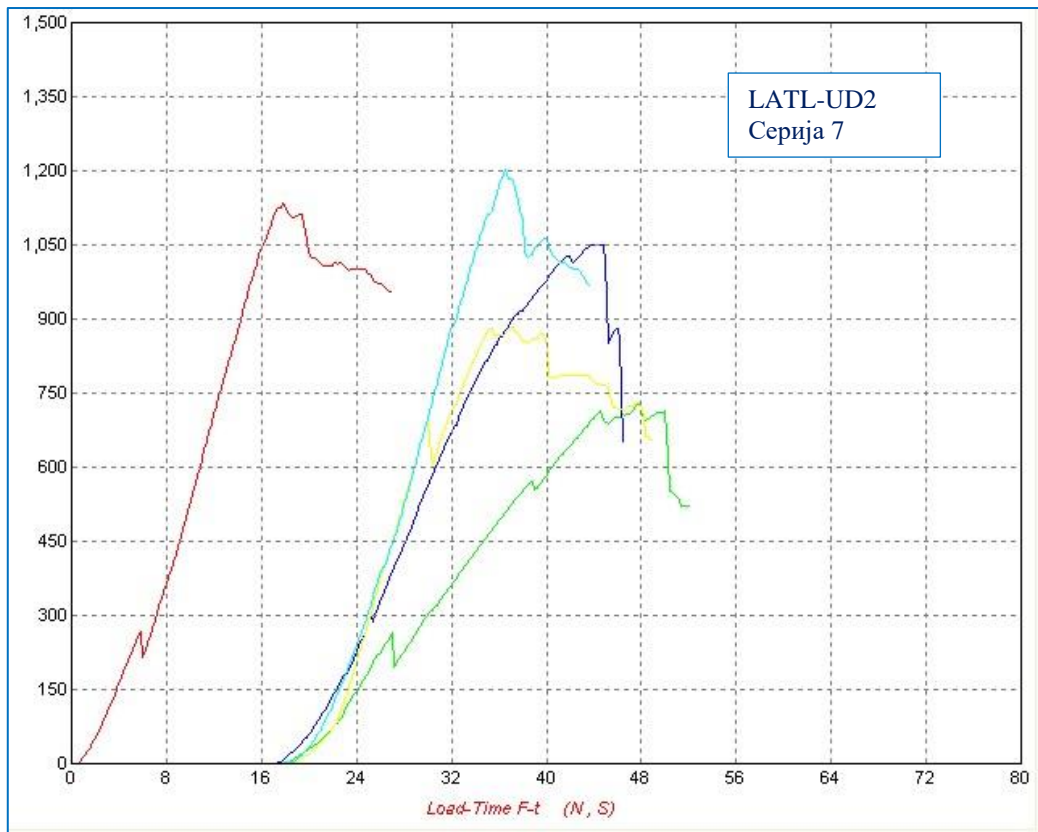
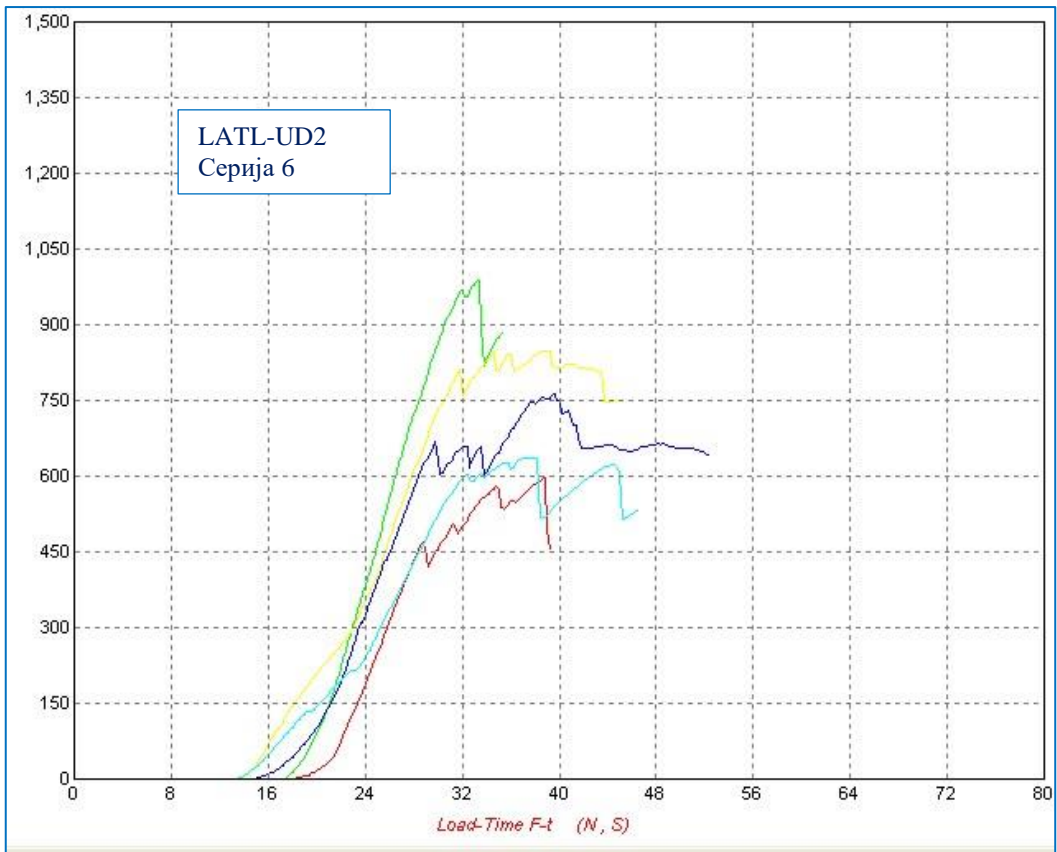
Табела 7.10. Пресметка на разликите меѓу пресметаните и експериментално добиените вредности за примероците LATL-UD2

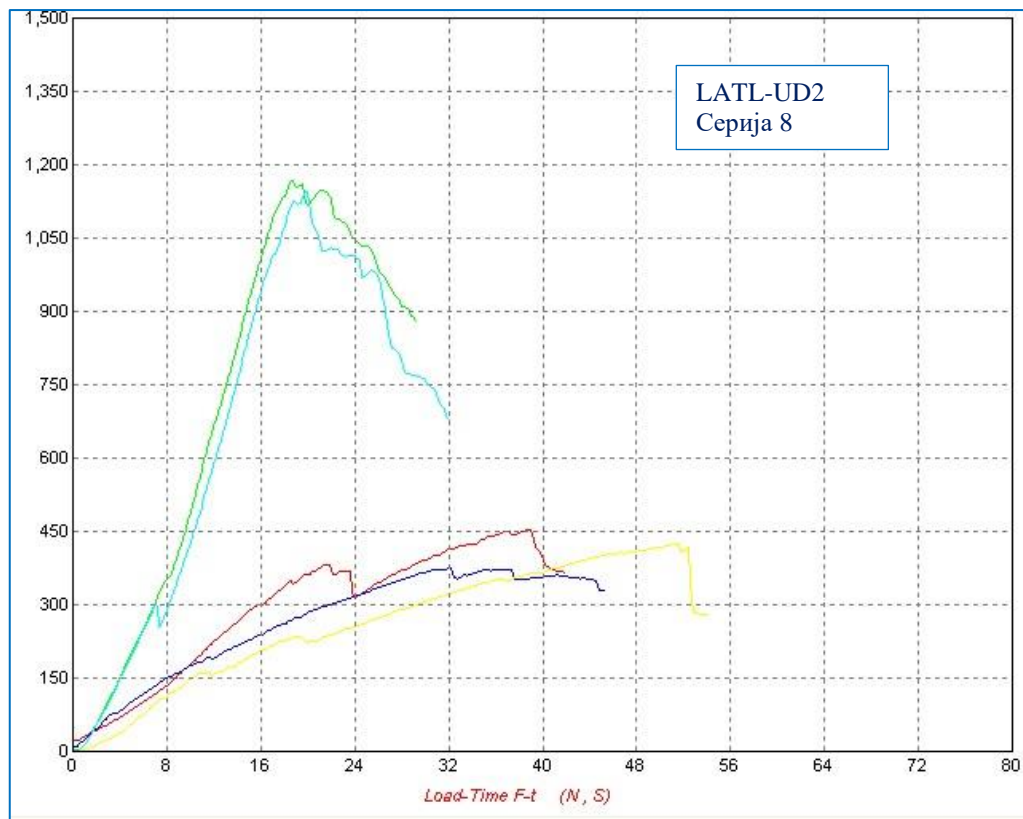
N	\bar{y}	y_p	$(\bar{y} - y_p)$	$(\bar{y} - y_p)^2$
1	1138,67	1084,09	54,56	2979,48
2	975,20	948,09	27,11	734,92
3	990,69	1084,09	-93,39	8722,07
4	959,78	948,09	11,70	136,85
5	973,42	982,13	-8,71	75,86
6	764,03	846,13	-82,11	6741,93
7	1029,65	982,13	47,52	2257,91
8	889,44	846,13	43,31	1875,05
$\sum_{j=1}^N (\bar{y} - y_p)^2 =$				23524,06

На слика 7.4 дадени се добиените дијаграми сила – време (N , *sek.*) од универзалната машина за тестирање на примероците LATL-UD2 од серија 1 до серија 8.









Слика 7.4. Добиени криви сила – време ($N, sek.$) од тестирање на ламинатните плочи LATL UD2 од серија 1 до серија 8

Како што може да се види од добиените дијаграми, однесувањето на примероците е слично како кај примероците со ознака LATL UD1, имено има линеарно однесување до ослабување односно пукање на некој од слоевите, а после извесно време комплетно кршење на примерокот. Примероците од серија 1 кои се добиени на високо ниво на анализирани фактори покажаа највисоки вредности за напрегање при свиткување. Исто така, високи вредности покажаа примероците од серија 7 каде што температурата на ласер и притисокот на валјачето се на високо ниво додека аголот на ласер е на ниско ниво. Тоа покажува дека кога првиот и третиот фактор се на горно ниво, аголот на ласер има многу мало влијание врз јакоста при свиткување на примероците. На слика 7.5. даден е примерок од серија 1 и серија 7 после извршено тестирање на истите, од каде што може да се забележи дека има добро поврзување на слоевите, а ослабувањето се случува во средина на примерокот. Примероците од серија 6 покажаа најмало напрегање при свиткување. Тие се добиени кога температурата на ласер и притисокот на компакционото валјаче се на ниско ниво, а аголот на поставеност на ласерот е на високо

ниво. Тоа повторно ја потврдува значајноста на првиот и третиот фактор.



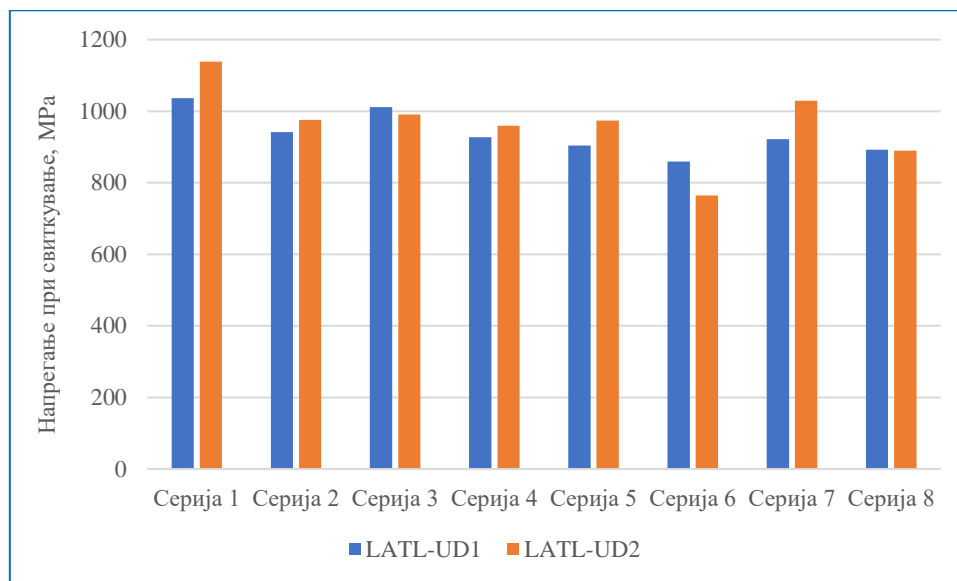
Слика 7.5. Изглед на примероци LATL UD2 серија 1 и серија 6 после тестирање

Резултатите од тестирањето на примероците со ознака LATP-UD2 покажаа дека повисоката температурата на процесирање и поголемиот компакционен притисок на валјачето влијаат на добивање ламинатни плочи со повисоки вредности за напрегање при свиткување. Се додека материјалот односно полимерната матрица е во температурен опсег на топење, олеснета е дифузијата на макромолекулите меѓу слоевите што претставува добар предуслов за добивање на подобро поврзување, а со тоа и добри јакостни карактеристики на примероците. Притисокот на валјачето е дополнителен фактор кој влијае во прилог на создавање на добар интерфејс меѓу слоевите, затоа што тоа ги притиска празнините со воздух кој се наоѓаат заглавени меѓу слоевите. Кога ќе се примени доволен притисок на валјаче врз материјалот кој веќе е на температура каде полимерната матрица е со понизок вискозитет (степен) настанува добро поврзување на слоевите. Во исто време, компакционото валјаче ги притиска и неправилностите што се појавуваат на површината на лентите за да може да се добие подобар контакт меѓу нив.

Затоа, поголемиот притисок на валјачето може да доведе до подобро поврзување на слоевите и добивање на ламинатни плочи со поголемо напрегање при свиткување. Тоа е потврдено со истражувања каде што е следена промената на празнините со промена на притисокот на валјачето. Khan et al. [54] во своите истражувања за влијанието на технолошките параметри врз јакостните карактеристики при свиткување на добиените термопластични ламинати, ја следеле содржината на пори со варијација на притисокот на валјачето од 50 до 5000 N. Тие анализирале примероци со 15 слоеви составени од ленти термопластичен препрег. Забележале дека има деконсолидација на пори во загреаната област каде што паѓаат ласерските зраци пред валјачето да притисне. За да се консолидираат празнините потребно било да се примени поголем притисок на валјачето и брзо ладење на таа состојба со цел да се „замрзне“ односно така да кристализира. Затоа, важно е во каква интеракција ќе биде аголот на поставеност на ласерот односно аголот под кој паѓаат ласерските зраци со применетиот компакционен притисок. Тоа се потврдува и од добиените резултати во истражувањата во оваа докторска дисертација и од добиената регресиона равенка за ламинатните примероци со ознака LATL UD2, каде што може да се забележи значајноста на интеракцијата на овие два фактори.

7.2.3. Дискусија на резултатите добиени за влијанието на технолошките параметри за ламинатните примероци LATL-UD1 и LATL-UD2

Врз основа на направените истражувања за влијанието на технолошките параметри врз напрегањето при свиткување на ламинатните примероци LATL-UD1 и LATL-UD2, може да се заклучи дека тоа зависи главно од применетата температура на процесирање и применетиот компакционен притисок на валјаче. На слика 7.6 даден е графички приказ за добиените вредности за напрегање при свиткување кај ламинатните плочи од серија 1 до серија 8 добиени од двата различни типови термопластичен унидирекционален препрег UD1 и UD2. Ламинатните плочи врз основа на двата типови унидирекционален препрег покажаа приближно исти вредности за напрегање при свиткување. Најдобра јакост покажаа примероците од серија 1 и серија 5 за ламинатните плочи со ознака LATL-UD1 и примероците од серија 1 и серија 7 за ламинатните плочи со ознака LATL-UD2. Додека, најмала вредност за напрегање при свиткување покажаа примероците од серија 6 од двата типови ламинатни плочи LATL-UD1 и LATL-UD2. Примероците од серија 2, серија 3, серија 4 и серија 8 имаат приближно исти вредности за напрегање при свиткување која е за околу 10% пониска од највисоката вредност.



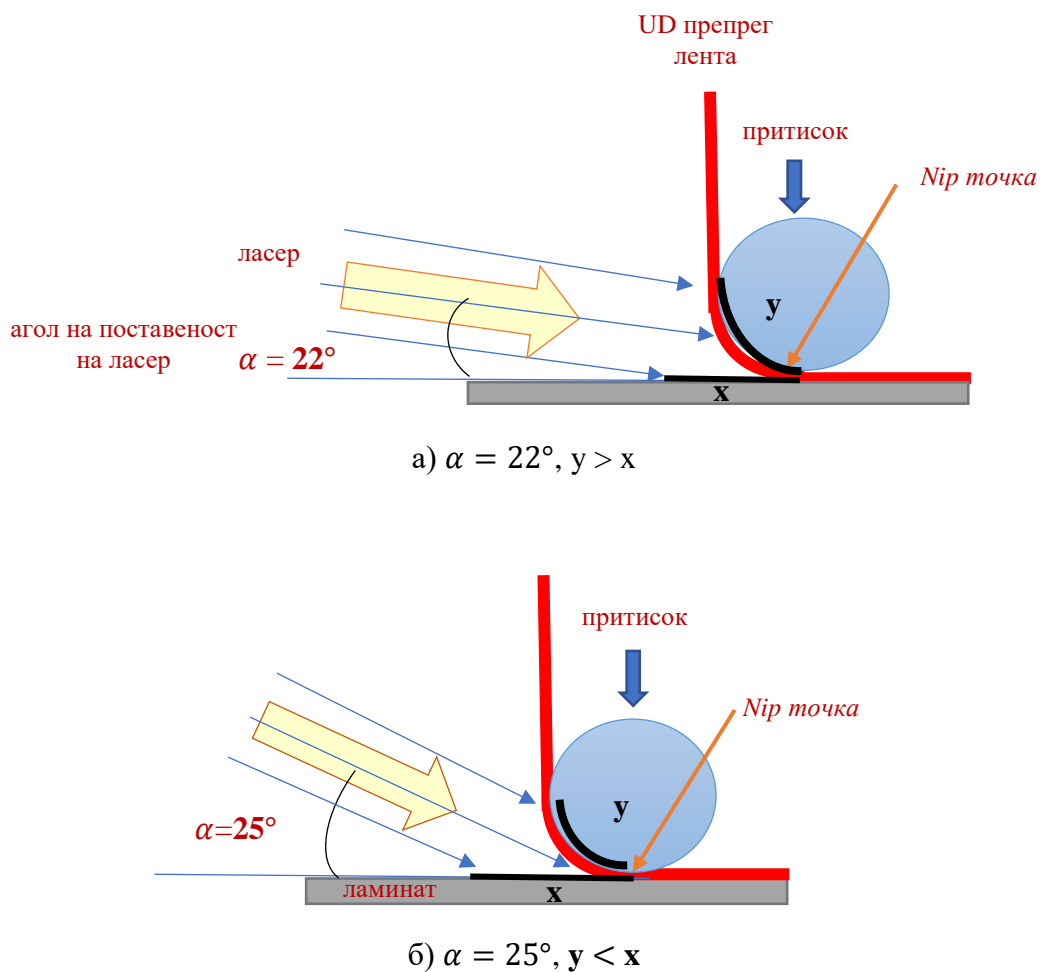
Слика 7.6. Напрегање при свиткување кај ламинатните плочи со ознака LATL-UD1 и LATL-UD2

Процесот на автоматизирано полагање на ленти за истражувањата во рамките на оваа докторска дисертација дозволува варирање на температурата на ласерот, аголот на поставување на ласерот, компакциониот притисок и брзината на полагање. За истражувањата направени во рамките на оваа докторска дисертација брзината на полагање е земена за постојана, а анализиран е ефектот од варирање на останатите три фактори. Типот на оптика кој се примени при полагање на лентите дозволува примена на ограничена брзина на полагање, а дополнително, кога има варијација на температурата на ласер и притисокот на валјачето, брзината не може да биде многу варирана. Затоа, е земена за постојана, а вариран е аголот под кој паѓаат ласерските зраци. Потоа, сумиран е ефектот од влијанието на температурата на ласерот, притисокот на валјачето и аголот под кој паѓаат ласерските зраци.

Површината на лентата која што се полага покриена е со тенок микронски слој од термопластична матрица која го олеснува поврзувањето на слоевите. Термопластичната матрица претставува сплет од полимерни вериги каде што движењето на индивидуалните вериги е ограничено. Под дејство на топлина полимерните вериги добиваат топлинско движење како резултат на што доаѓа до зголемување на степенот на интердифузија. Во случај кога се работи со семикристални термопластични полимери,

присуството на кристализирани области сериозно го инхибира процесот на интердифузија. Затоа, за такви типови на термопластични полимери потребно е примена на повисока температура. За да дојде до добро поврзување на слоевите и да се формира силна врска меѓу нив потребно е кога ќе настане контакт во *nip* точката да дојде до интердифузија на полимерните молекулите од двете површини кои дошле во контакт. Кога температурата е доволно висока и кога слоевите се под доволно голем притисок тогаш доаѓа до остварување на интимен контакт меѓу слоевите и нивно самоповрзување. За да настане тоа потребно е лентата да е загреана односно претходно да има апсорбирано топлина од ласерските зраци кои паѓаат на неа. На слика 7.6 а) и б) шематски претставено е влијанието на аголот под кои паѓаат ласерските зраци односно аголот на поставеност на ласерот кога тој се наоѓа на долно и горно ниво. Аголот на поставеност на ласерот управува со распределбата на светлината меѓу лентата и ламинатот. Имено, кога аголот на поставеност на ласерот е на долно ниво односно кога е 22° , во тој случај ласерските зраци покриваат поголема должина од унидирекционалната лента која се полага, а помала должина од ламинатот како што е прикажано на слика 7.7 а) $x < y$. Кога ласерските зраци паѓаат на лентата, тие еден дел се апсорбираат, а друг дел се рефлектираат од материјалот. Пожелно е поголем дел од ласерската светлина да биде апсорбирана. Како резултат на тоа полимерните вериги добиваат случајно топлотно движење. Исто така и делот од ламинатот на кој паѓаат ласерските зраци апсорбира топлина и тука полимерните вериги добиваат подвижност. Кога така загреаната лента ќе се притисне со доволен притисок во *nip* точката настанува интимен контакт и интердифузија на полимерните молекули. При тоа, кога температурата и притисокот на валјачето се на горно ниво доаѓа до добро притискање на загреаните слоеви. При движење на валјачето во насока на полагање на лентата со брзина од 150 mm/sec или 9m/min, што е користена како постојана во истражувањата, со тек на време доаѓа до зголемување на јакоста на врската што се создава меѓу слоевите. Степенот на самоповрзувањето се определува преку јакоста на врската што се создава, а тоа резултира во повисоки или пониски добиени вредности за напрегање при свиткување на ламинатот. Од тестираните серии примероци од двата типови ламинатните плочи со ознака LATL-UD1 и LATL-UD2, забележано е дека највисоки вредности за напрегање при свиткување имаат тие што се добиени на горно ниво на трите фактори и примероците добиени кога на горно ниво се температурата на ласер и притисокот на валјачето, а аголот на поставеност на ласер на долно ниво. Меѓутоа, од

добиените резултати може да се забележи дека добро напрегање при свиткување имаат и примероците кои се добиени со примена на повисок притисок на валјаче, при температурата на долно ниво и агол на поставеност на ласер од 22° и 25° . Тоа значи дека и пониската температура од ласерот овозможува доволно загревање на материјалот за да може при висок притисок да дојде до добро самоповрзување. Тоа покажува дека многу е важно влијанието на двата фактори: притисок на валјаче и агол на поставеност на ласер, а помало е влијанието од интеракцијата на температурата на ласер и аголот на поставеност на ласер. Тоа може да се види и од добиените регресиони равенки.

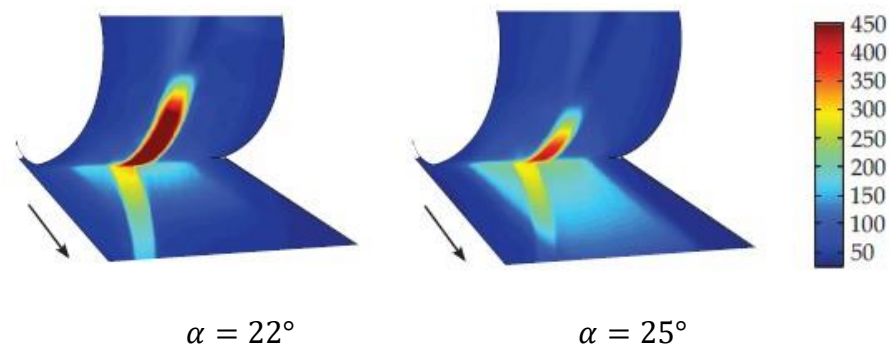


Слика 7.7. Шематски приказ на влијанието на аголот на поставеност на ласер

Кога притисокот на валјачето и температурата на ласер се на долно ниво, а аголот на поставеност на ласер на горно ниво се добива најмала јакост при свиткување на примероците. Тоа покажува дека температурата иако е на долно ниво постои топлотно

движење на полимерните молекули, но притисокот не е доволно голем за да настане силна врска меѓу слоевите. Поради помалиот притисок може да заостане и воздух меѓу слоевите кое исто така резултира во помала јакост на врска. Во случај кога аголот на поставеност на ласер е 25° тогаш поголем дел од ласерските зраци паѓаат на ламинатот, а помал дел на препрег лентата како што е прикажано на слика 7.6. б) $x > y$. Ласерските зраци се насочени директно на препрег лентата блиску до *nip* точката каде валјачето треба да притисне. Меѓутоа, ласерските зраци не навлегуваат во *nip* точката затоа што се појавува засенување од ролерот. При примена на повисока температура на процесирање, унидирекционалната лента се загрева на повисока температура во однос на ламинатот. Ламинатот не може да се загрее на температура повисока од температурата на топење на полимерната матрица затоа што тука полимерните молекули се веќе кристализирани и не може да ја добијат истата топлотна подвижност како тие во лентата за полагање. Меѓутоа, кога температурата на ласерот и притисокот се на горно ниво доаѓа до добро самоповрзување на слоевите и добра јакост на врска меѓу нив, што е добиено и при помал агол на поставеност на ласер. За примероците добиени на тие услови, вредноста за напрегање при свиткување е приближно иста како кај напрегањето при свиткување што го покажуваат примероците добиени кога трите параметри се на горно ниво. Од тоа јасно може да се заклучи дека влијанието на аголот на поставеност на ласер е најмало од трите анализирани фактори. Кога температурата и притисокот се на долно ниво, добиените примероци имаат помали вредности за напрегање при свиткување без разлика дали аголот на поставеност на ласер е на горно или на долно ниво. Аголот на поставеност на ласерот ја регулира распределбата на ласерските зраци меѓу лентата и ламинатот. Со зголемување на аголот на поставеност на ласерот, должината на загреаната лента се намалува, додека, со намалување на аголот на поставеност на ласерот се зголемува должината на загреаниот ламинат. W. J. B. Grouve et al. [111, 113] во нивните истражувања предложиле оптички модел за полагање на термопластична лента врз основа на јаглеродни влакна и PPS. Тие ја следеле распределбата на ласерските зраци и топлотниот флуks на ласерот во регионот околу *nip* точката односно на лентата и на ламинатот и тоа кога ласерските зраци паѓаат под различен агол. Тие графички го илустрирале придонесот на светлината што доаѓа директно од ласерскиот извор, како и светлината што се рефлектира од лентата и од ламинатот. За да го добијаат оптичкиот модел, биле следени следните параметри: ширина на ласерски зрак, дијаметар на валјаче, индекс на прекршување на светлина на лентата и на ламинатот. Забележале дека

ласерските зраци не можат длабоко да навлезат во *nip* точката и дека распределбата на зраците се намалува во близина на *nip* точката. Исто така, распределбата на ласерските зраци се намалува и кога лентата се наведнува во однос на ласерскиот извор. Но, тогаш настанува допирање на лентата со ламинатот и почнува интердифузијата на полимерните молекули и самопврзувањето. Со применетиот модел ја определиле распределбата на зраците и топлотниот флукс на ласерот, а потоа со термички модел ја определиле температурната дистрибуција во лентата и ламинатот. На слика 7.8 претставена е распределбата на температурата на површината на ламинатот и на лентата, добиена со термичка камера.



Слика 7.8. Шематски приказ за распределба на температурата на лентата и ламинатот [111]

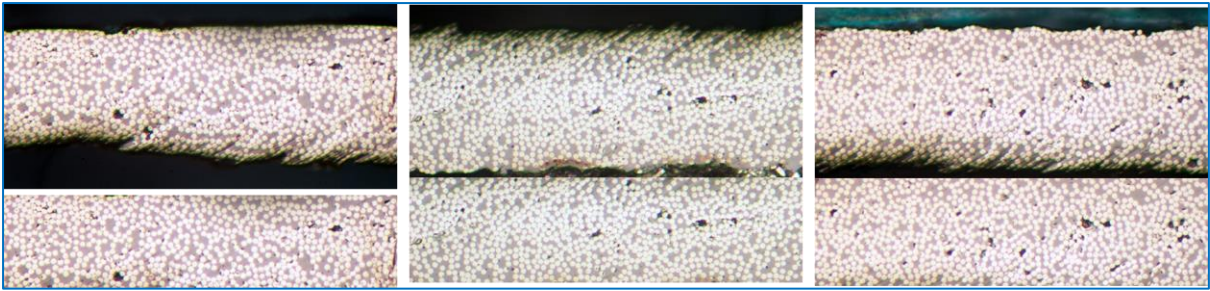
Добиените слики јасно укажуваат дека аголот на поставеност на ласерот ја контролира распределбата на температурата на лентата и ламинатот како што е добиено и во истражувањата во оваа докторска дисертација. Кога ласерот е поставен под агол од 22° најголем дел од ласерските зраци паѓаат на лентата предизвикувајќи висока температура на лентата, а ниска на ламинатот. Зголемувањето на аголот α ја намалува максималната температура на лентата, а ја зголемува минималната температура на ламинатот. Експериментите што ги правеле Grove et al. [113] покажале дека максималната температура на лентата ја надминува температурата на ламинатот. Дополнително, температурата на површината на ламинатот не може да биде поголема од температурата на топење на полимерната матрица. Истите заклучоци се добиени и од истражувањата направени за сите примероци ламинатните плочи со ознака LATL-UD1 и LATL-UD2 во рамките на оваа докторска дисертација. Меѓутоа, за сите тестирани примероци добиена е релативно добра јакост на врска што резултира во добри вредности за напрегања при

свиткување на сите примероци со најголемо отстапување од околу 20% од највисоката вредност. Напрегањето при свиткување за сите испитувани примероци зависи главно од промената на притисокот и температурата во *nip* точката, а аголот на поставеност на ласерот само ја распределува ласерската светлина меѓу лентата и ламинатот. Времето потребно за да настане интимниот контакт меѓу лентата која се полага и ламинатот се намалува со зголемување на применетиот притисок или со намалување на вискозитетот на термопластичната матрица. Интимниот контакт настанува под компакционото валјаче во *nip* точката. Времето на контакт под валјачето е обратнопропорционално на брзината на полагање на лентата и претставува ограничување за примена на големи брзини. Затоа, во истражувањата во оваа докторска дисертација, брзина на полагање од 9 m/min или 150 mm/sec е земена како најсоодветна. Примената на повисока температура на процесирање го олеснува развојот на интимен контакт како резултат на температурната зависност на вискозитетот на полимерната матрица. Времето на спојување на препрегот со ламинатот односно времето да настане интердифузија на полимерните вериги и самоповрзување може да се намали со примена на повисока температура на процесирање. Иако високите температури ја олеснуваат интердифузијата на полимерните вериги, сепак примена на повисоки температури може да доведат и до деструкција на полимерот или негово вмрежување и негативно да влијаат на јакоста на врската и на механичките карактеристики на примероците. Од направените експерименти каде температурата на ласер и притисокот на валјаче се менувани на двете нивоа, јасно може да се забележи дека најдобри карактеристики имаат примероците кога двата фактори се на горно ниво. Помали вредности за околу 10% за напрегање при свиткување се добива за примероците кога еден од овие фактори е на горно, а друг на долно ниво, а најслаби кога двата фактори се на долно ниво.

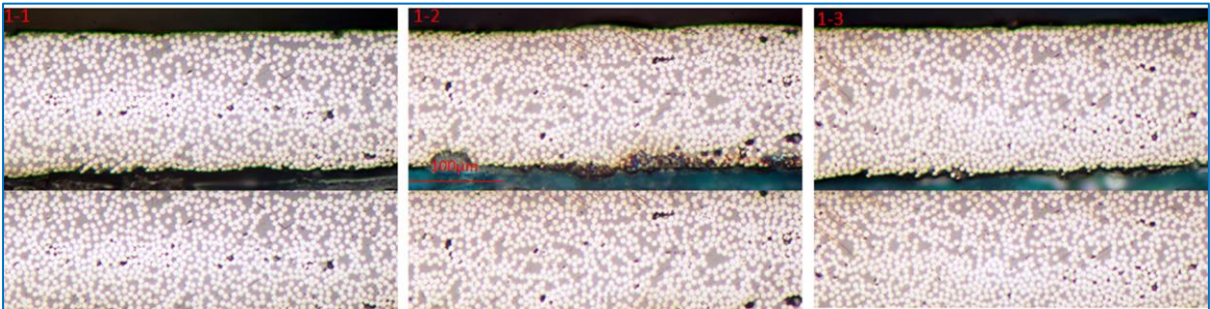
7.2.4. Микроскопски анализи за ламинатните примероци LATL-UD1 и LATL-UD2

Во рамките на истражувањата за докторската тема, направени се микроскопски анализи на примероци ламинатни плочи и тоа на оние кои покажаа најдобри и најслаби вредности за напрегање при свиткување. Со помош на оптички микроскоп и скенирачкиот електронски микроскоп снимени се попречните пресеци на издвоените примероци ламинатни плочи со цел да се анализира поврзаноста на слоевите, јакоста на врска и интердифузијата на полимерните молекули. Областите богати со полимерна матрица на површината на лентата која се поврзува, претставуваат предуслов за добро

поврзување на слоевите. Степенот на интимен контакт зависи главно од тоа, но зависи и од постоењето на голем број неправилности кои се јавуваат на површината на лентата. Затоа, направени се снимки и на комерцијално добиените унидирекционални препрег материјали со ознаки UD1 и UD2, а потоа на добиените примероци со најниска и со највисока вредност за напрегање при свиткување. На слика 7.9 дадени се слики добиени од оптички микроскоп за унидирекционални препрег ленти со ознаки UD1 и UD2. Направени се по шест снимки на попречен пресек од двата типови препрег ленти со зголемување од 200 пати. На добиените слики јасно се забележуваат двата конституенти на препрегот: јаглородните влакна и полимерната матрица, како и присуството на пори. Јаглородните влакна претставуваат белите кругчиња, а сивата позадина претставува термопластичната матрица. Црните точки претставуваат пори кои ги има во самиот препрег. Тоа значи дека препрег лентите од самиот производител се испорачани со одреден процент на пори. Од направените снимки на оптички микроскоп и со примена на соодветен софтвер определено е дека процентот на пори за UD1 и за UD2 е 0,17. Овој процент на пори е добиен како средна вредност од процентот на пори во сите шест снимени примероци. На снимките јасно може да се види дека горната површина од препрег лентите има неправилности односно нерамнини. Дополнително направени се снимки на добиените препрег ленти и со помош на скенирачки електронски микроскоп. СЕМ снимките се направени со зголемување од околу 700 пати на попречните пресеци на истите примероци од препрег лентите снимени со оптички микроскоп, а на делови каде се забележани одредени специфичности, означени со црвени кругови на сликите, направени се поголеми зголемувања и до 1800 пати. Добиените СЕМ снимки дадени се на слика 7.10. и јасно покажуваат одредени празнини и неправилности во самите препрег материјали. Од сите издвоени региони видливи се празнини, а влакната се добро обложени со термопластична матрица, но постојат региони само со полимерна матрица. Појавените нерегуларности не покажуваат промени во структурата на влакната и матрицата. Од добиените снимки јасно може да се видат нерегуларности и нерамнини на површината на препрег лентите, а исто така видлив е и тенкиот слој на полимерна матрица која треба да го овозможи поврзувањето на слоевите во ламинатот.

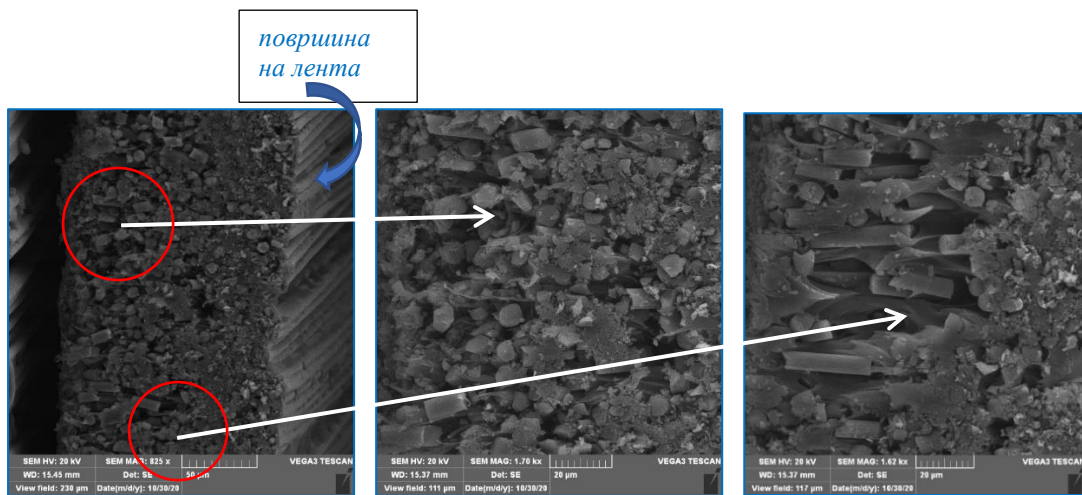


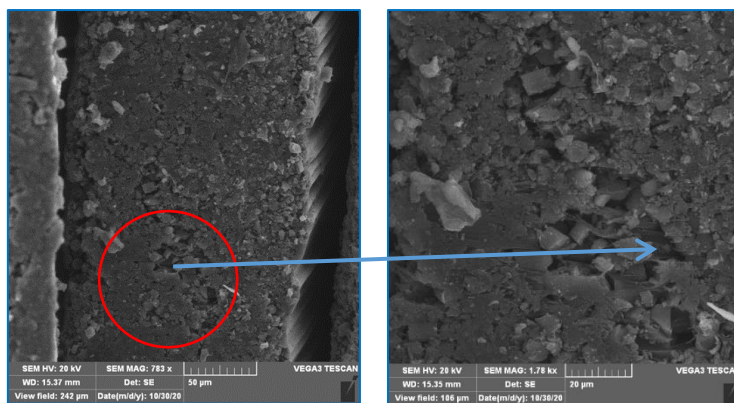
а) оптички снимки на унидирекционален препрег UD1



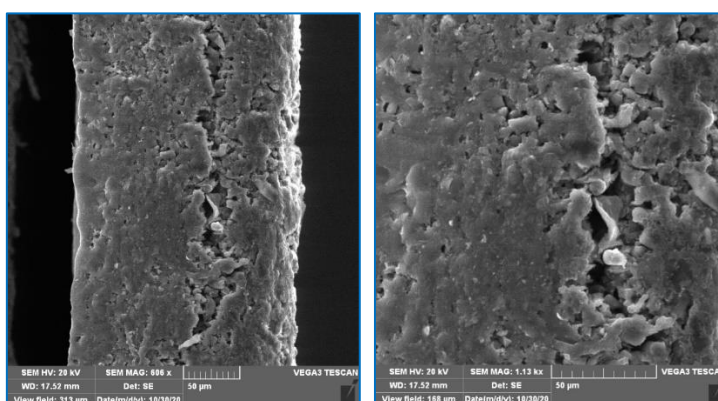
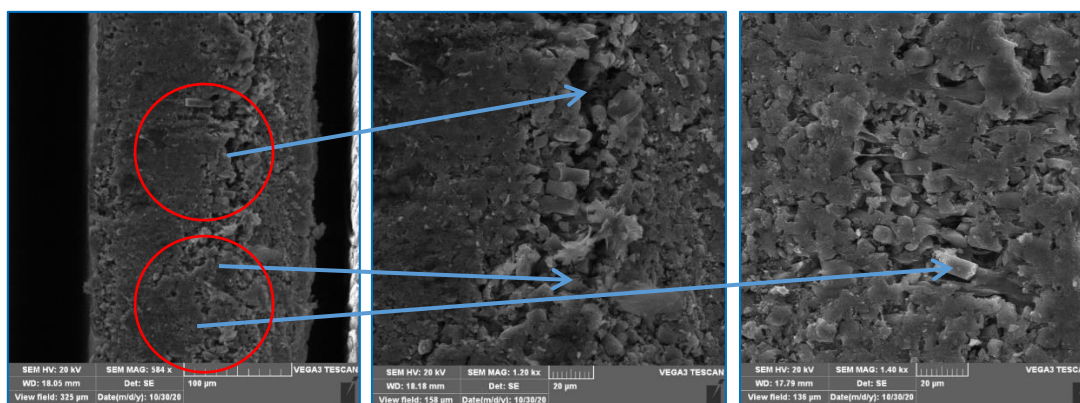
б) оптички снимки на унидирекционален препрег UD2

Слика 7.9. Оптички снимки на попречен пресек на унидирекционална препрег лента а) UD1; б) UD2





а) препрег лента UD1



б) препрег лента UD2

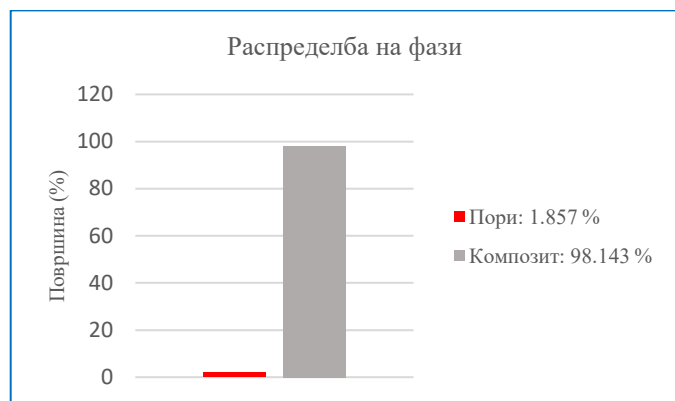
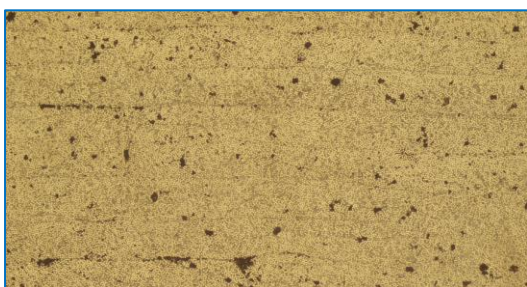
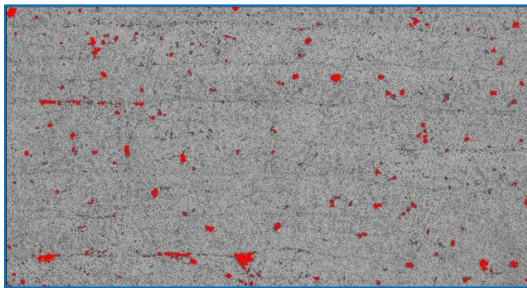
Слика 7.10. SEM снимки на унидирекционални препрег ленти а) UD1; б) UD2

За да се постигне добра јакост на врска меѓу слоевите всушност треба да настане добар физички односно интимен контакт и добра интердифузија на полимерните вериги. Површините на унидирекционалната лента и на ламинатот не се идеално мазни, како што може да се види и од сликите погоре, туку тие содржат одредени неправилности. Затоа, интимен контакт не може да се постигне со едноставно доведување и

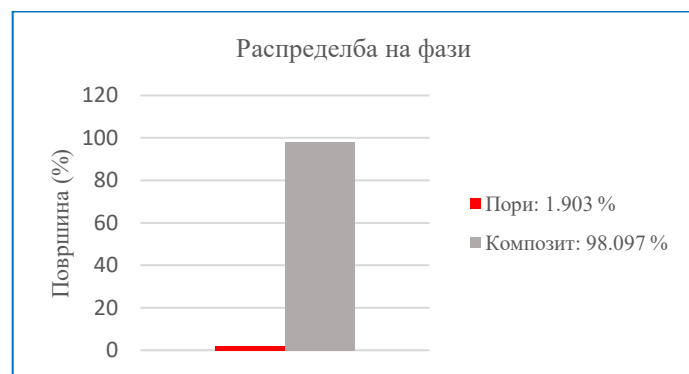
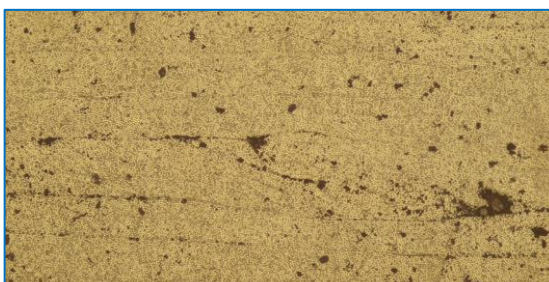
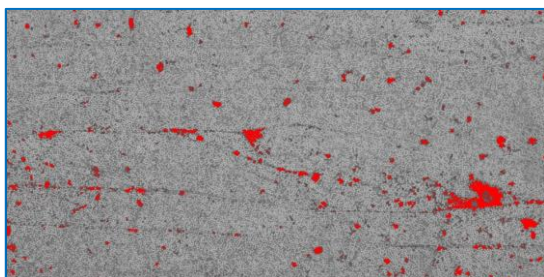
добрближување на површините заедно. Потребно е да се примени притисок за да се деформираат неправилностите со што ќе се зголеми степенот на интимниот контакт меѓу површините. Времето за да се постигне добар интимен контакт зависи од грубоста на површините, применетиот притисок и вискозитетот на полимерната матрица. Зголемувањето на температурата го олеснува создавањето на добар интимен контакт како резултат на зависноста на вискозитетот на полимерната матрица од температурата. Развојот на интимен контакт најпрво бил опишан од Daga и Loos [114] кои грубоста на површините ја претставуваат како нееднакви правоаголници. Lee и Springer [64] го поедноставиле моделот со тоа што површинските нерамнини ги анализираат како еднакви правоаголници, како што е објаснето во Глава 4.2 во теоретскиот дел од овој докторски труд. Применетиот притисок доведува правоаголниците да се деформираат. Откако ќе се случи интимниот контакт меѓу површините настанува интердифузија на полимерните вериги. Со тек на време полимерните вериги се движат и се шират преку интерфејсот и се заплеткуваат со другите полимерни вериги од спротивната страна. Со зголемување на бројот на вака заплеткани полимерни вериги исчезнува оригиналниот интерфејс и не може да се разликуваат полимерните вериги од двете површини. Настанува добро поврзување и изгледа како да е еден полимер, без да се забележува граница на разделба на површините кои се споиле. Процесот на дифузија на полимерните молекули кај термопластичните материјали најдобро го опишува De Gennes [115] преку теоријата за подвижност на макромолекулите. Lamèthe et al. [116] го проучувале спојувањето на ленти врз основа на PEEK и јаглородни влакна врз основа на теоријата на подвижност на полимерните молекули. Тие забележале дека интерфејсот се подобрил кога површините убаво се стопиле. Споредливи резултати добиле и Plummer et al. [117] и Zanetto et al. [118] кои го проучувале спојувањата на семикристални полимерни површини.

Добра поврзаност може да се забележи кај ламинатните плочи од серија 1 и серија 3 од двата типови примероци: со ознака LATL-UD1 и LATL-UD2 каде температурата на ласерот и притисокот на валјачето се на горно ниво. Добиените снимки од оптички микроскоп со зголемување од 200 пати, дадени се на слика 7.11, а на слика 7.12 дадени се СЕМ микроскопските слики на издвоените региони од оптичките снимки. На снимките направени на оптички микроскоп јасно може да се види бројот на слоеви и интерфејсот меѓу нив. Црните кругови ги претставуваат порите во ламинатот, а додека кафеавата површина претставува препрегот. Бледите хоризонтални линии ја

претставуваат поврзаноста на слоевите. Јасно е видно дека постои добра врска меѓу слоевите, особено кај примерокот LATL-UD1 серија 1.



а) LATL-UD1 серија 1



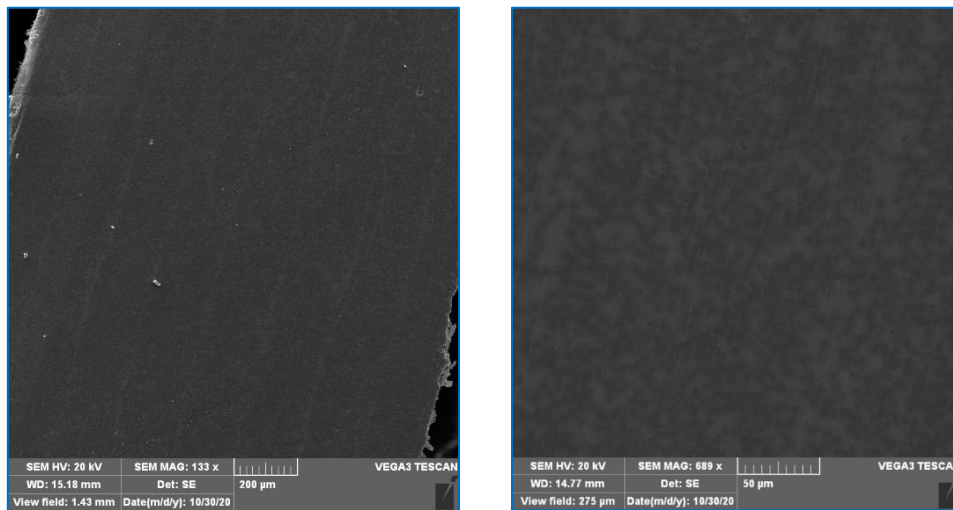
б) LATL-UD1 серија 3

Слика 7.11. Металографски снимки од оптички микроскоп на попречен пресек на примероци ламинатни плочи со ознака LATL-UD1 а) серија 1; б) серија 3

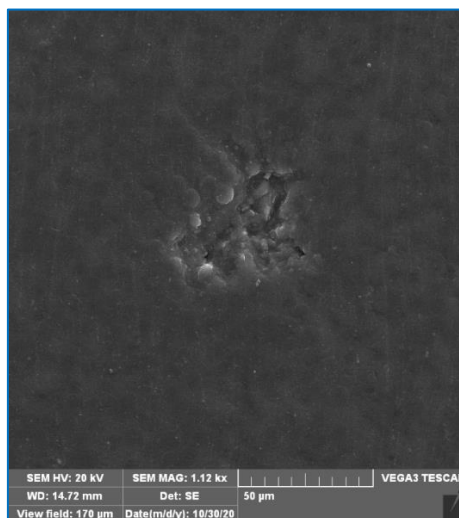
На границата на разделба на слоевите има на некои места слаби трагови на празнини, но определен е мал процент на пори од 1,86% од вкупната површина од ламинатот. Кај примерокот LATL-UD1 серија 3 определена е содржина на пори од 1,90%. Содржината на пори е многу мала во двата примерока што покажува дека примената на притисок на валјаче на горно ниво и температура на горно ниво резултира во постигнување на добар интимен контакт меѓу површините, добра интердифузија на полимерните молекули и добра автохезија односно самоповрзување. На тој начин, постигната е добра јакост на врска меѓу слоевите што се потврдува и со добиените високи вредности за напрегање при свиткување на овие примероци. Слични вредности за содржина на пори добиено е и за примероците ламинатни плочи со ознака LATL-UD2 серија 1 и серија 3. Направените оптички снимки се дадени на слика 7.13, а сликите добиени од скенирачка електронска микроскопија се дадени на слика 7.14. Процентот на пори кај овие примероци не е поголем од околу 2,5 % и на добиените слики јасно се гледа дека е постигнат добар интерфејс меѓу слоевите.

На слика 7.12 дадени се СЕМ снимки на попречен пресек на примероци ламинатни плочи со ознака LATL-UD1 серија 1 и серија 3. Попречниот пресек е снимен со помало зголемување од околу 150 пати со цел да се видат сите осум слоеви, слика 7.12. а) лево. Од сликата јасно се евидентира дека е постигнато поврзување на слоевите што укажува на добра интердифузија на полимерните молекули. Со цел подлабоко да се види микроструктурата, истиот примерок е снимен со зголемување од околу 700 пати, слика 7.12. б) десно. Зголемената снимка го потврдува доброто поврзување на слоевите меѓу себе при што не се забележува интерфејс и не може да се разликуваат полимерните вериги од двете површини. Бидејќи е настанат добар интерфејс изгледа како да е еден полимер во кој се инкорпорирани јаглеродните влакна, а тие исто така се добро обложени со термопластичната матрица. На слика 7.12 б) издвоен е еден сегмент од примерокот LATL-UD1 серија 3 кај кој е забележана структурна нехомогеност на сликата 7.11. б) добиена со оптичкиот микроскоп. Направена е СЕМ снимка на тој сегмент со зголемување од околу 1200 пати и забележана е празнина во која всушност влакната се добро натопени со полимерна матрица, меѓутоа како да недостига горна затворена површина. Вакви неправилности се забележани на неколку места и кај примероците со ознака LATL-UD2 серија 1 и серија 3, кои не можат да се класифицираат како пори, а сепак е заробен дел од воздухот и површината не е континуирана како останатата. Вакви дефекти влијаат кон вкупните напрегања на ламинатните плочи и

затоа напрегањето при свиткување за овој тип ламинатни плочи од серија 3 има пониски вредности за 10% во однос на примероците од серија 1.

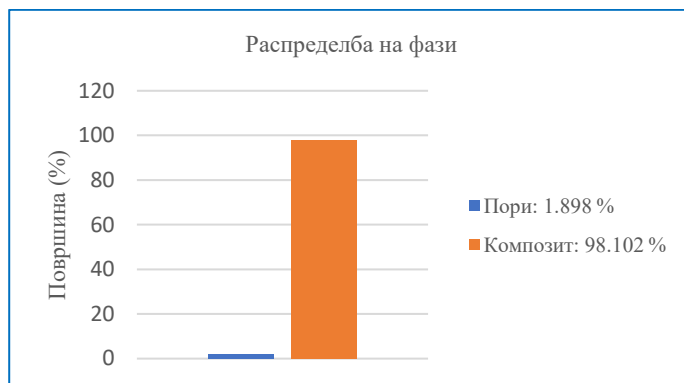
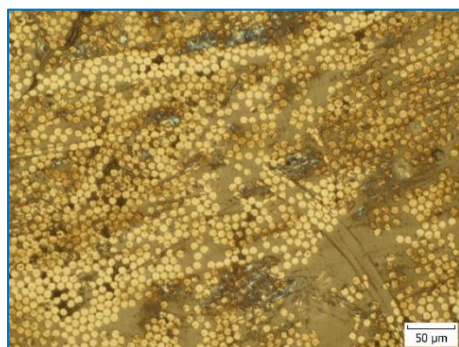
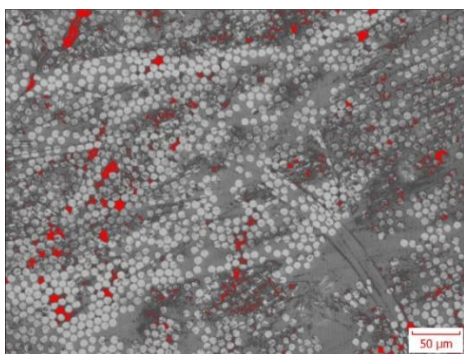


а) LATL-UD1 серија 1

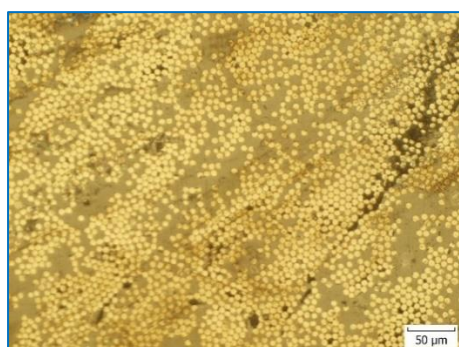
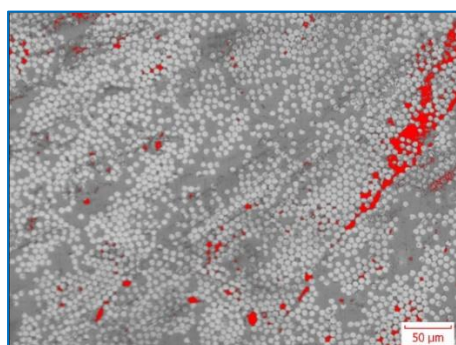


б) LATL-UD1 серија 3

Слика 7.12. СЕМ снимки на попречен пресек на примероци ламинатни плочи со ознака LATL-UD1 а) серија 1; б) серија 3

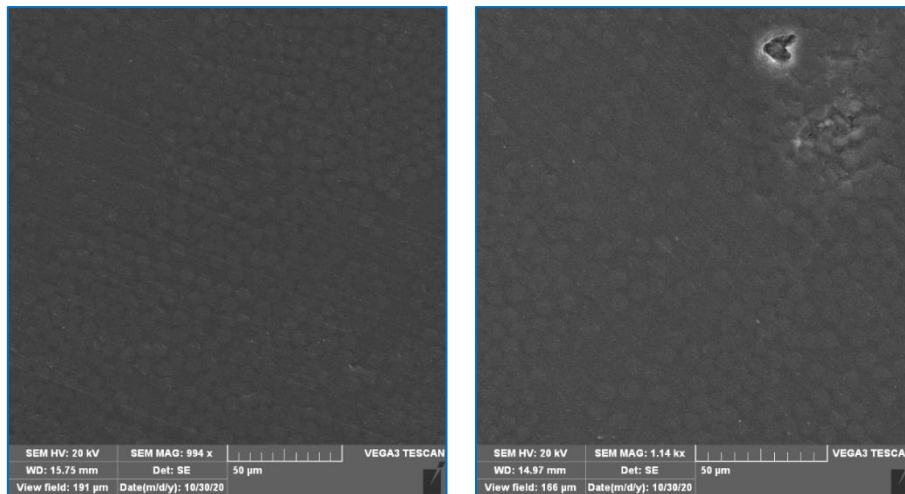


а) LATL-UD2 серија 1

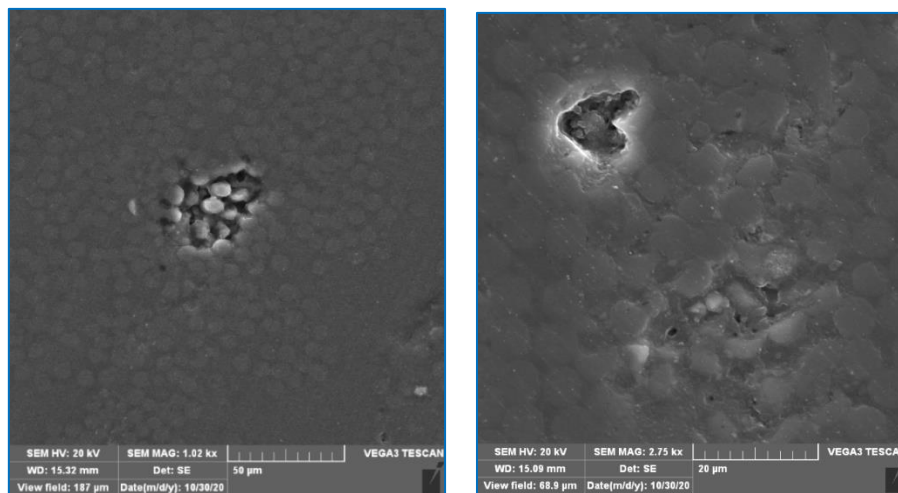


б) LATL-UD2 серија 3

Слика 7.13. Металографски снимки од оптички микроскоп на попречен пресек на примероци ламинатни плочи со ознака LATL-UD2 а) серија 1; б) серија 3



а) LATL-UD2 серија 1

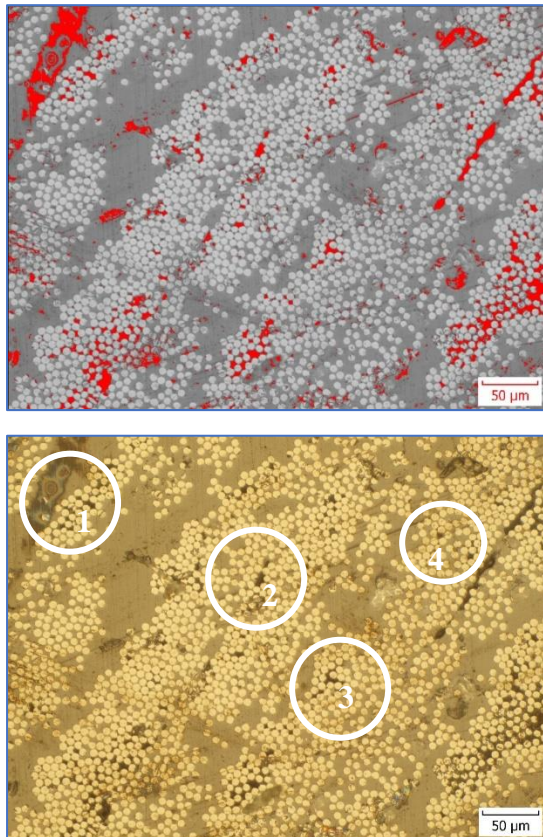


б) LATL-UD2 серија 3

Слика 7.14. SEM снимки на попречен пресек на примероци ламинатни плочи со ознака LATL-UD2 а) серија 1; б) серија 3

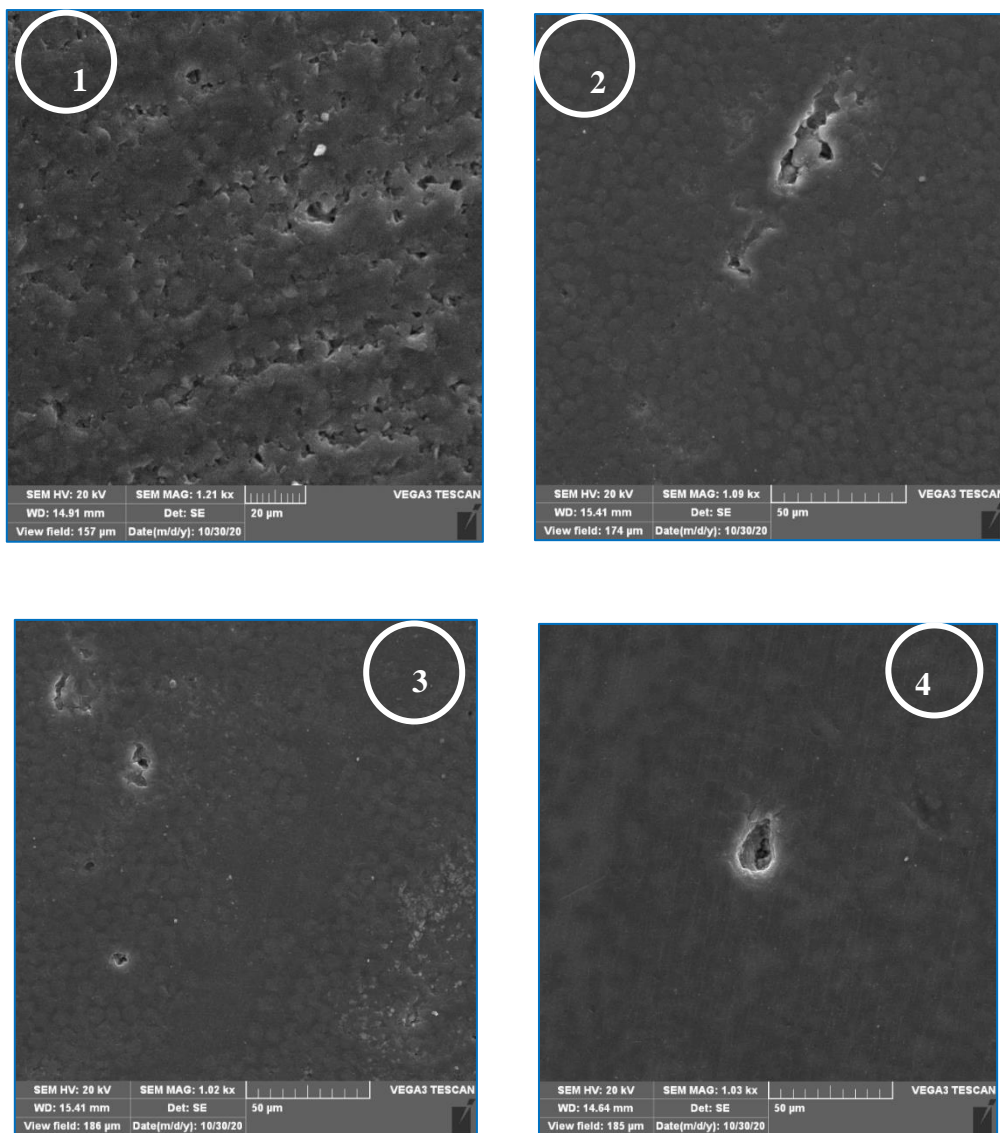
Примероците кои имаат пониски вредности на напрегање при свиткување (серија б) појавуваат поголем број на пори особено во пределите на интерфејсот. Тоа се примероци добиени на ниско ниво на притисок на валјаче и температура на процесирање, а појавата на поголем процент на пори се должи на недоволно големиот применет притисок на валјаче. Металографските снимки добиени со оптички микроскоп за тие примероци дадени се на слика 7.15. Од добиените оптички снимки јасно се видливи делови со полимерна матрица меѓу слоевите (сива област) и видливи се слоевите влакна покриени со термопластичната матрица. Во импрегнираните делови се забележуваат пори кои се појавени поради примената на помал компакционен притисок на валјаче. Кај

овие примероци добиен е вкупен процент на пори од 4,85% што е двојно поголем во споредба со процентот на пори кај примероците од серија 1 и серија 3. Тоа се потврдува и со добивање на пониски вредности за напрегање при свиткување за околу 17% кај овие примероци во однос на примероците од серија 1 и серија 3.



Слика 7.15. Металографски снимки од оптички микроскоп на попречен пресек на примероци ламинатни плочи со ознака LATL-UD1 серија 6

Порите се всушност дефекти во микроструктурата на ламинатот и кога процентот на пори е поголем, а ламинатот е изложен на притисок на оптеретување, тогаш тие пори допринесуваат да се добијаат пониски вредности за напрегање при свиткување. Областите каде има пори означени со кругови (1, 2, 3 и 4) се снимени подлабоко со скенирачки електронски микроскоп со зголемување 1200 пати за да се види какви се тие празнини.

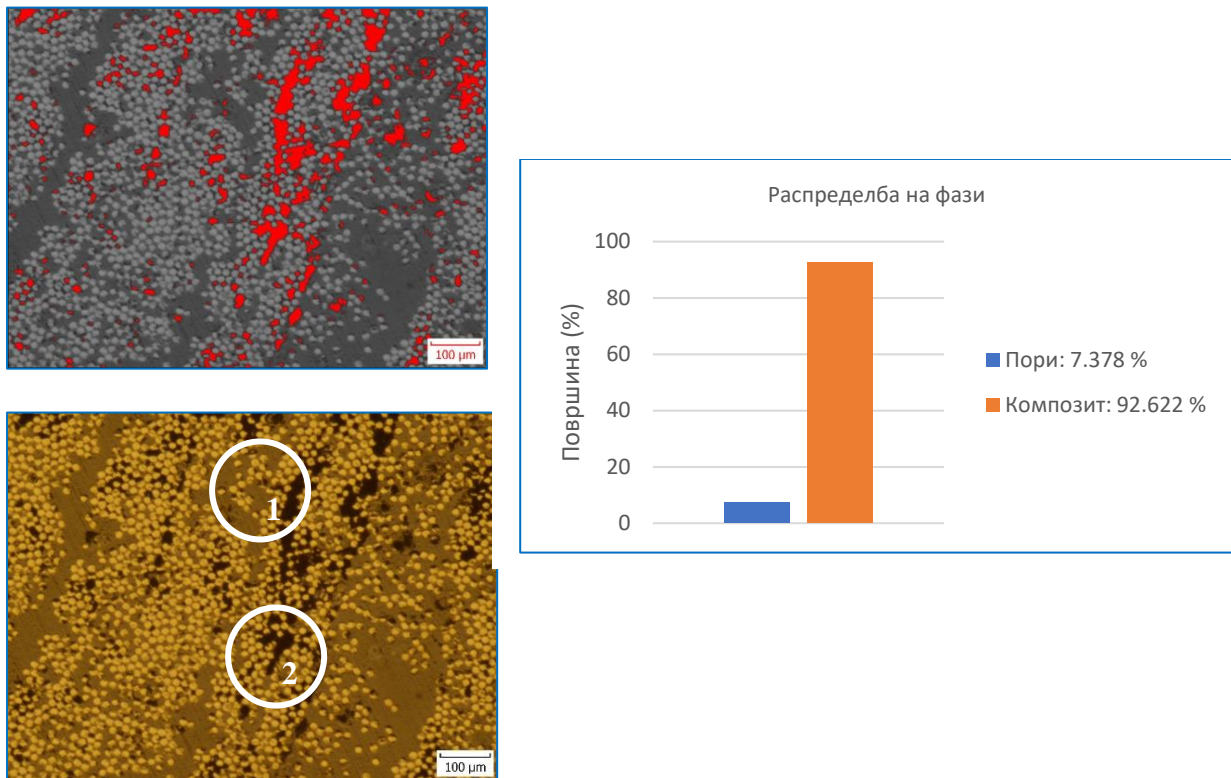


Слика 7.16. СЕМ снимки на попречен пресек на примероци ламинатни плочи со ознака LATL-UD1 серија 6

Левата СЕМ снимка на слика 7.16 горе покажува постоење на пори во полимерната матрица и меѓу влакната, кои се појавуваат како резултат на недоволна компакција на притиснатите површини. И покрај тоа што температурата е повисока, сепак на одредени места се појавуваа одреден степен на недоволна поврзаност што е резултат на присуство на порозност. Меѓутоа, тоа е мал процент во однос на вкупната површина на композитот. При анализа на попречните пресеци на примероците од серија 6 забележано е дека сепак во голем процент е постигнат добар интимен контакт и добар интерфејс. Напрегањето при свиткување на овие примероци е за околу 17% помало во однос на највисоката

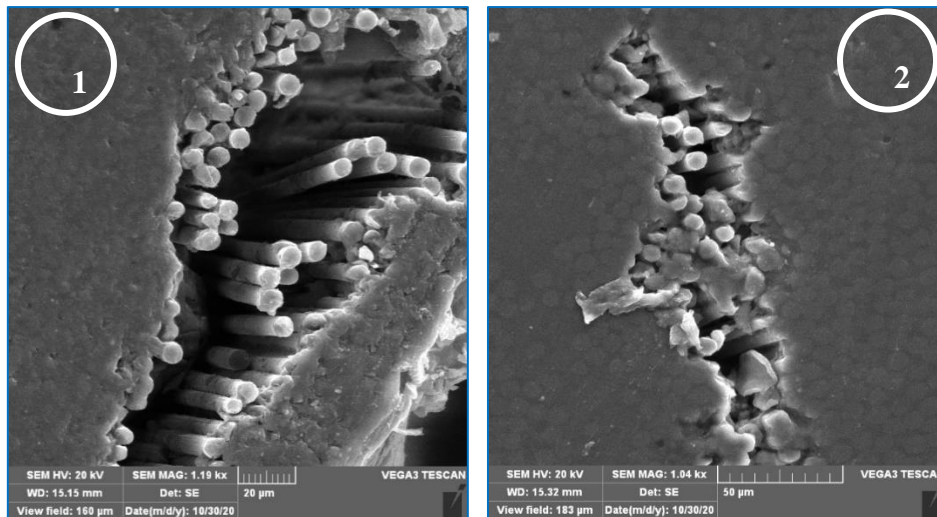
добиена вредност за примероците од серија 1. Тоа се должи на присуството на пори од околу 5 % кај овие примероци. На останатите СЕМ снимки јасно се забележуваат делови со влакна добро потопени и обложени со термопластична матрица, делови само со полимерна матрица и на некои места појава на пори. O.Celik et al. [120] во нивните истражувања го следеле развојот на интимен контакт меѓу слоевите при автоматизиран процес на полагање на препрег ленти врз основа на јаглеродни влакна и РЕЕК. Притоа, тие го анализирале влијанието на некои процесни параметри: промена на температура на процесирање, агол на ласерски зраци и притисок на компакционо валјаче врз добивањето на добар интимен контакт. За концептот на ефективен интимен контакт, кој се базира на содржината на полимерна матрица на површината, вовеле методологија за негово мерење врз основа на добиените микрофотографии од површините. Определениот степен на интимен контакт го споредувале со постоечките модели за интимен контакт: модел на идентичен правоаголник од Lee и Springer [64], и фракталниот модел на Yang и Pitchumani [65]. Тие покажале дека ефективен интимен контакт се развива при доволен притисок на валјачето и дека важна улога има и дистрибуцијата на температурата по површината. Појава на поголем процент на пори забележани се кај примероците ламинатни плочи со ознака LATL-UD2 серија 6. Снимките добиени од оптички микроскоп дадени се на слика 7.17, а СЕМ микроскопските снимки на слика 7.18. Кај овие примероци процентот на пори е поголем во споредба со примероците со ознака LATL-UD1 од серија 6. Заробени празнини се појавени во слоевите што значи дека празнините може да потекнуваат и од самите препрег ленти. Бидејќи применетиот притисокот на валјаче за добивање на овие примероци е помал, веројатно во одделни делови не настанала добра консолидација на празнините и добро израмнување на лентите. Од СЕМ снимките каде одредени делови се зголемени до 1200 пати јасно се видливи празнините по должина на слоевите и продлабочени во насока на влакната. Од снимките јасно се гледа дека влакната се доволно натопени со матрица но, поради малиот притисок на сила некои влакна на некои места се лабави и издвоени во празнината. Amanat et al. [119] забележале појава на слични пори при полагање на термопластични ленти врз основа на РЕЕК. Иако, прецизно потеклото на овие пори не било јасно, авторите даваат две можни објаснувања. Првото вклучува топење на материјалот од матрицата на повисока температура од нејзината температура на топење предизвикувајќи „вриење“ на полимерот, а тоа условува заробување на гасни меурчиња, додека пак второ вклучува испарување на

апсорбираната вода во матрицата. Во нашите истражувања нема појава на топење на термопластичната матрица над температура на топење, а одредени празнини може да се должат на адсорбираната вода во матрицата. Деловите од композитот со матрица и споевите на слоевите покажуваат дека е постигната добра интердифузија на полимерните молекули. На добиените слики од оптички и СЕМ микроскоп, јасни и чисти се сивите области кои ја претсатвуваат полимерната матрица.

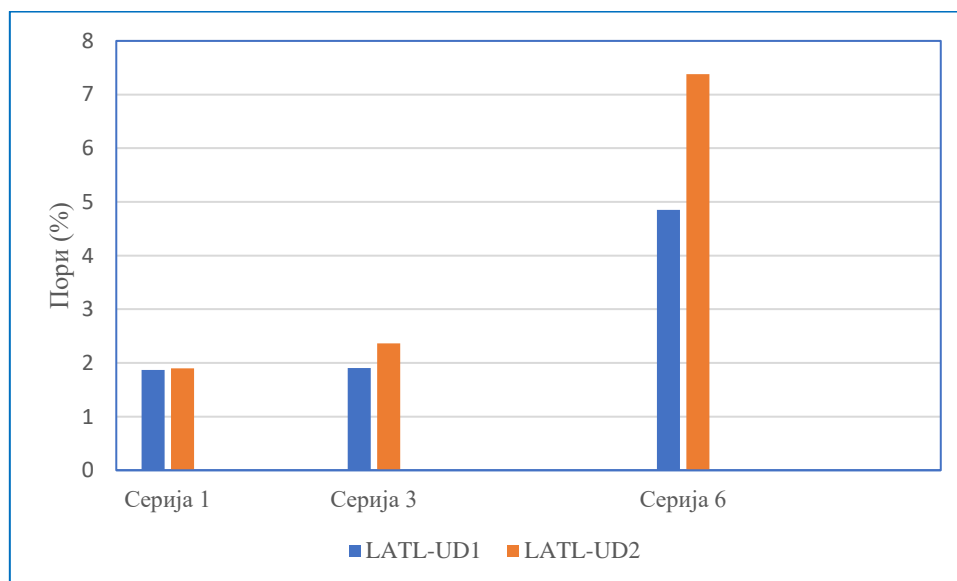


Слика 7.17. Металографски снимки од оптички микроскоп на попречен пресек на примероци ламинатни плочи со ознака LATL-UD2 серија 6

На слика 7.19 даден е графички приказ на добиениот процент на пори од оптичкиот микроскоп за примероците ламинатни плочи со ознаки LATL-UD1 и LATL-UD2. Примероците од серија 6 имаат поголем процент на пори во споредба со тие од серија 1 и серија 3. Повисок процент на пори има примерокот LATL-UD2 серија 6 што резултира и во помала вредност за напрегање при свиткување. Содржината на пори за останатите примероци спаѓа во дозволените граници за термопластични композити што обично е до $5 \pm 1\%$ [120].



Слика 7.18. СЕМ снимки на попречен пресек на примероци ламинатни плочи со ознака LATL-UD2 серија 6



Слика 7.19. Процент на пори кај тестираните примероци

7.2.5. Добивање на регресиона равенка за примероци со ознака LATL-UD3

Резултатите добиени од тестирањето на примероците ламинатни плочи со ознака LATL-UD3 серија 1 до серија 8, добиени со услови според план матрицата (табела 6.5), дадени се во табела 7.11. Резултатите од пресметаната средна вредност за напрегање при свиткување и определената дисперзија според равенката (6.2) за секоја серија добиени резултати заедно со средната вредност на дисперзијата, равенка (6.3) за примероците

ламинатни плочи со ознака LATL-UD3, дадени се во табела 7.11.

Табела 7.11. Резултатите од експериментите за примероци со ознака LATL-UD3

N	y_{j1}	y_{j2}	y_{j3}	y_{j4}	y_{j5}	$\sigma(\text{MPa})$ \bar{y}	S_j^2
1	1246,94	988,85	1091,70	1179,48	1132,86	1127,96	9375,30
2	1014,97	977,06	1119,56	923,88	883,79	983,85	33039,29
3	1207,96	1221,86	1040,47	1223,00	1264,30	1191,52	30295,42
4	959,36	1136,74	965,59	1151,51	1164,26	1075,49	42975,93
5	1106,86	1009,13	1111,84	1039,53	1179,17	1089,30	4449,34
6	650,07	726,37	803,01	779,27	757,96	743,34	14053,72
7	970,51	900,39	919,78	959,10	949,41	939,84	3361,37
8	816,16	848,97	870,51	854,04	859,37	849,81	1670,93
$\sum_{N=1}^8 S_j^2$							111571,82
$S_{jst.}^2$							13946,48
S_{β}^2							348,67
$ \beta_i $							36,60

За проценка на дисперзијата според Кохреновиот критериум, равенка (6.4) добиено е дека G_p изнесува 0,03012743. За ниво на значајност 0,05, број на степени на слобода $f = 4$ и број на опити $n = 5$ табеларната вредност на Кохрен, $G_{\alpha, f, N}$ изнесува 0,3912. Бидејќи е исполнет условот: пресметаната вредност да е помала или еднаква на табеларната вредност на Кохрен, проценката за дисперзијата на резултатите од тестирањата е дека таа е хомогена.

Во табела 7.12 дадени се пресметаните вредности на коефициентите β_i според равенка (6.8). Потоа, определена е значајноста на регресионите коефициенти со помош на Студентовиот (Student) критериум и добиено е дека секој коефициент по апсолутна вредност треба да биде поголем од или еднаков на 36,60 (табела 7.12). Од пресметаните вредности на β_i може да се забележи дека коефициентите: $\beta_2, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}, \beta_{123}$ по апсолутна вредност се помали од 36,60. Тоа значи дека факторите пред кои се овие коефициенти имаат мало влијание врз јачината при свиткување на ламинатните плочи.

Табела 7.12. Резултати од пресметките на вредностите на коефициентите, β_i

N	x_0	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}	\bar{y}
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1127,96
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	983,85
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1191,52
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1075,49
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1089,30
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	743,34
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	939,84
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	849,81

β	β_0	β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}	β_{23}	β_{123}
	1000,14	87,02	-14,03	94,57	35,50	-21,98	-24,77	-28,48

Според тоа, регресионата равенка со кодирани променливи ќе биде:

$$y = 1000,14 + 87,02x_1 - 14,03x_2 + 94,57x_3 + 35,50x_1x_2 - 21,98x_1x_3 - 24,77x_2x_3 - 28,48x_1x_2x_3 \quad (7.3)$$

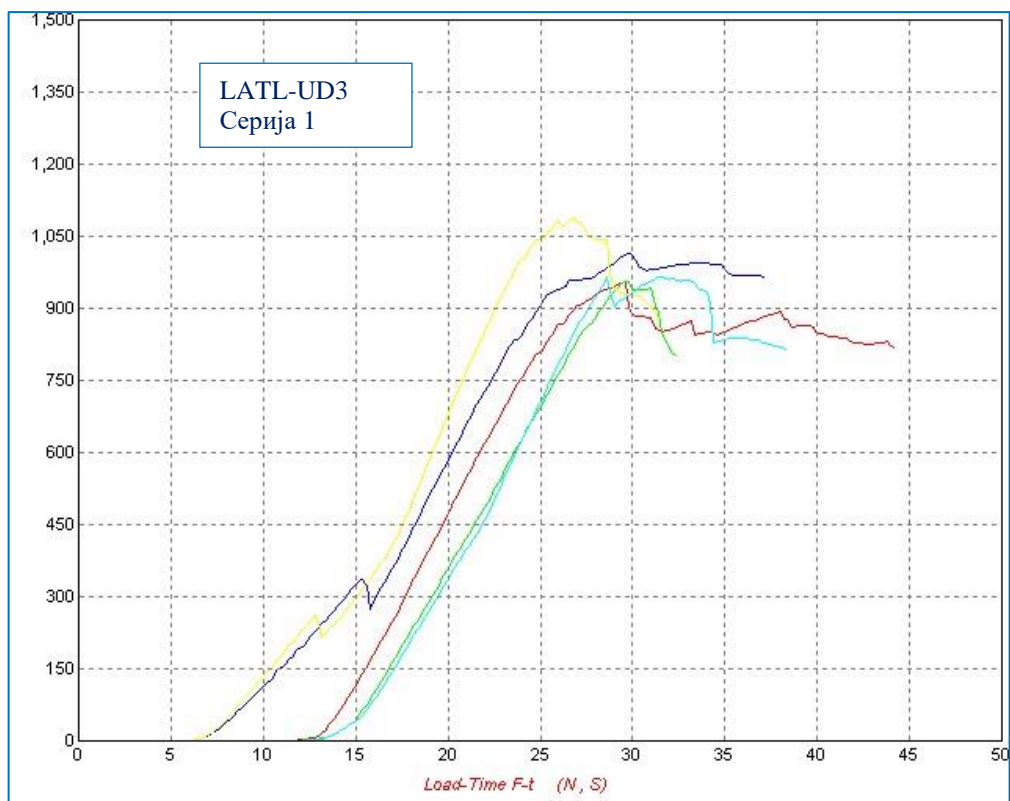
Од добиената регресиона равенка може да се забележи дека најголемо влијание врз напрегањето на ламинатните плочи LATL-UD3 при свиткување имаат процесните фактори x_1 и x_3 односно температурата на ласер и притисокот на валјачето. Влијанието на вториот процесен фактор е помало и обратно пропорционално врз јакоста на ламинатните плочи. Според добиената регресиона равенка може да се забележи дека има интеракција меѓу факторите, а како најзначајна е интеракцијата меѓу факторот агол на поставување на ласер и температурата на ласер. Интеракцијата на процесните фактори x_1 и x_3 како и x_2 и x_3 влијаат обратнопропорционално врз напрегањето при свиткување на ламинатните плочи. Интеракцијата меѓу трите фактори влијае со мала значајност врз напрегањето при свиткување на примероците.

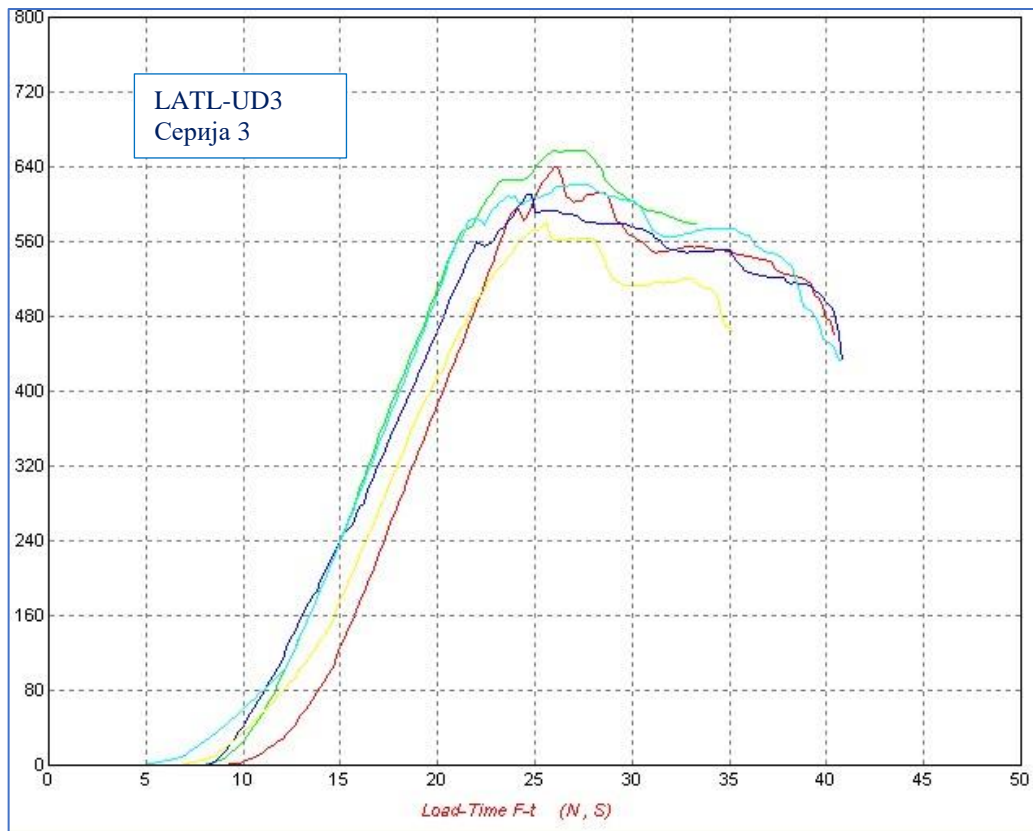
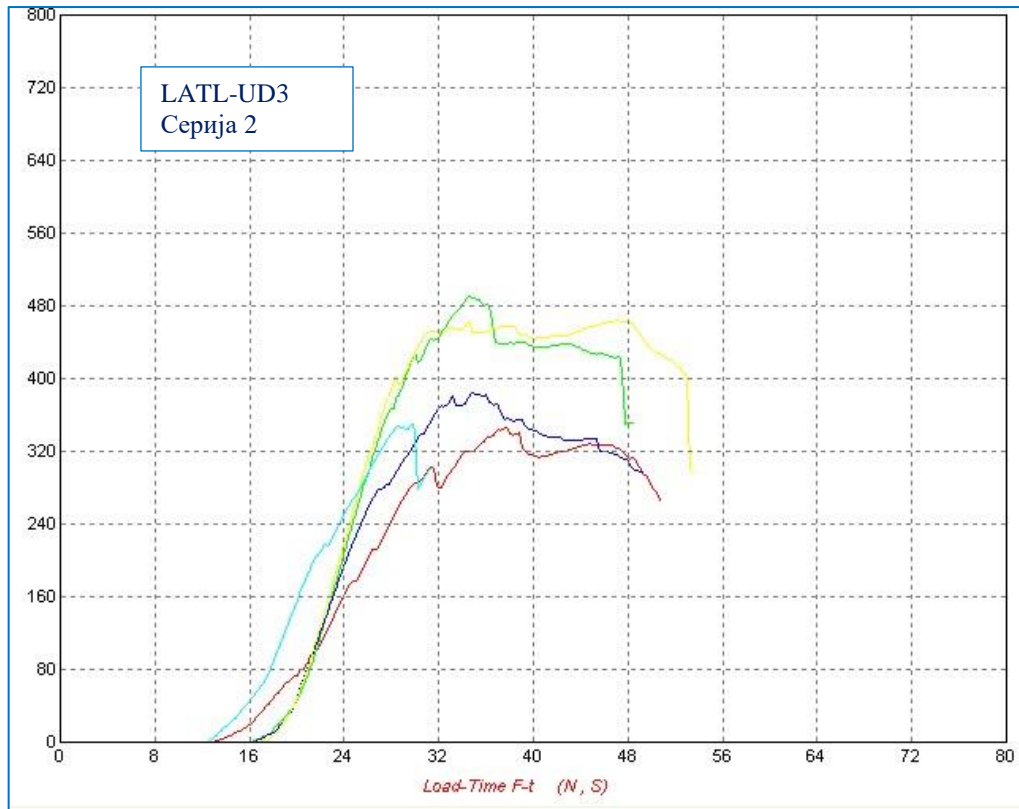
Определена е адекватноста на моделот со помош на критериумот на Фишер, според равенките (6.10) до (6.12). Во табела 7.13 дадени се вредностите добиени од експериментот \bar{y}_j и вредностите добиени од моделот y_j . Врз основа на пресметката за разликите меѓу пресметаните вредности според добиениот модел и експериментално добиените вредности за јачина при свиткување, добиено е дека F_p е 0,93. Табеларната вредност на Фишеровиот критериум за $P = 0,95$, $f = (n-1) = 5 - 1 = 4$ и $N=8 \times (5-1) = 32$ изнесува 2,69, и бидејќи е задоволен условот даден со равенка (6.10) добиено е дека **моделот е адекватен** и може да се користи.

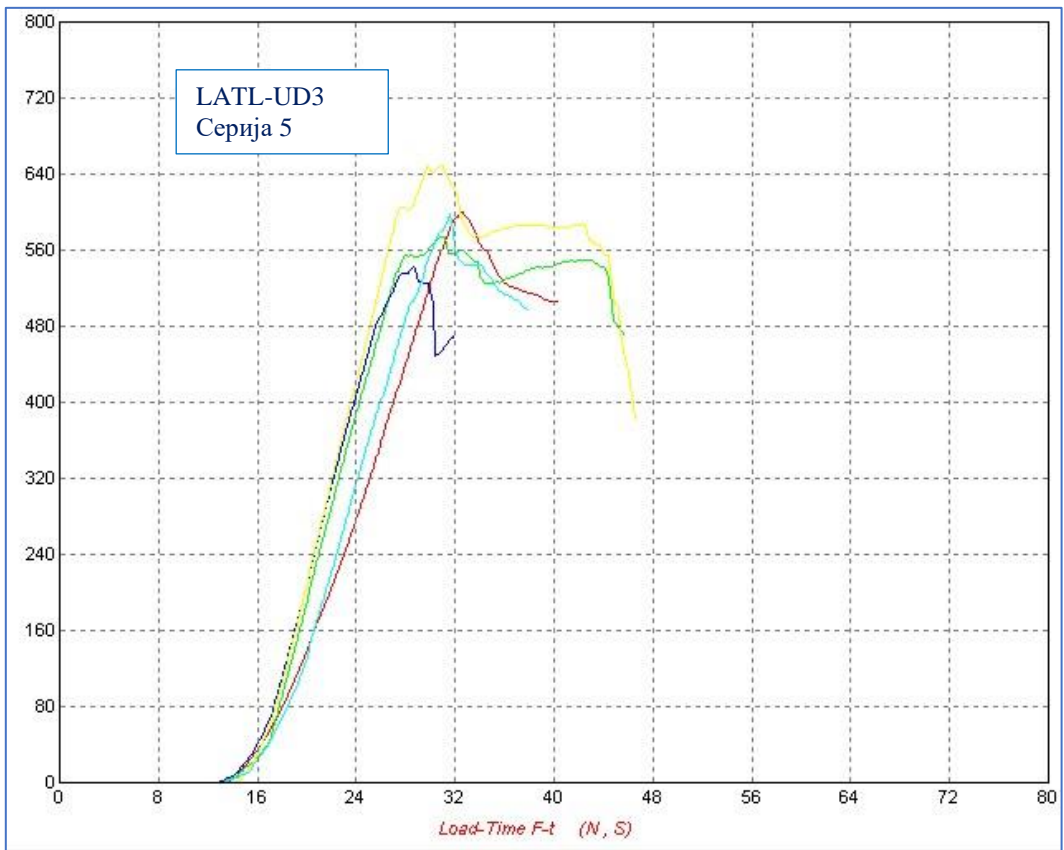
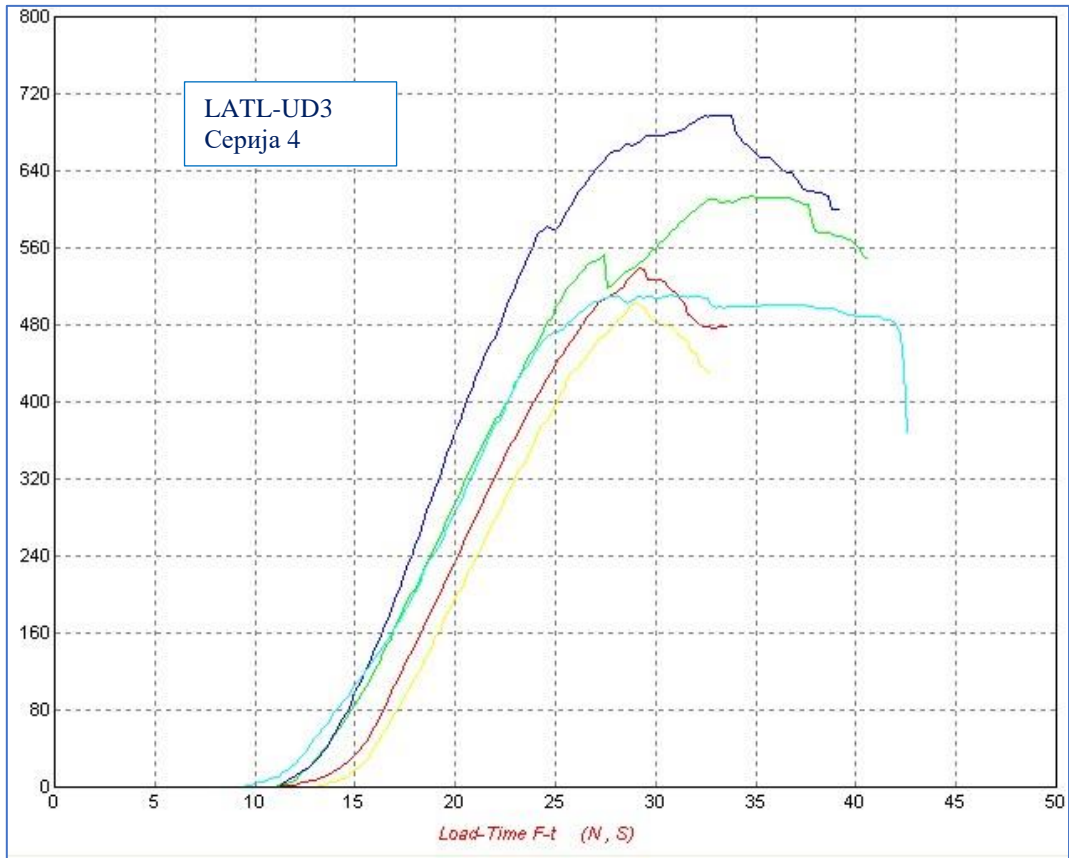
Табела 7.13. Пресметка на разликите меѓу пресметаните и експериментално добиените вредности

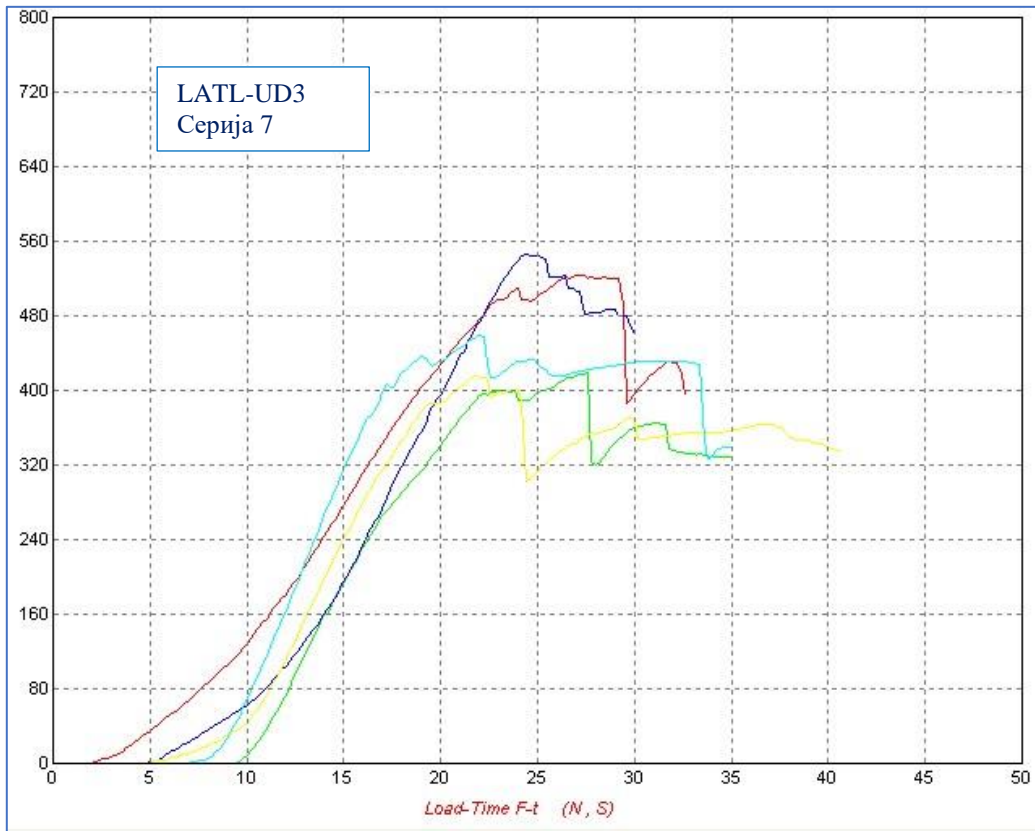
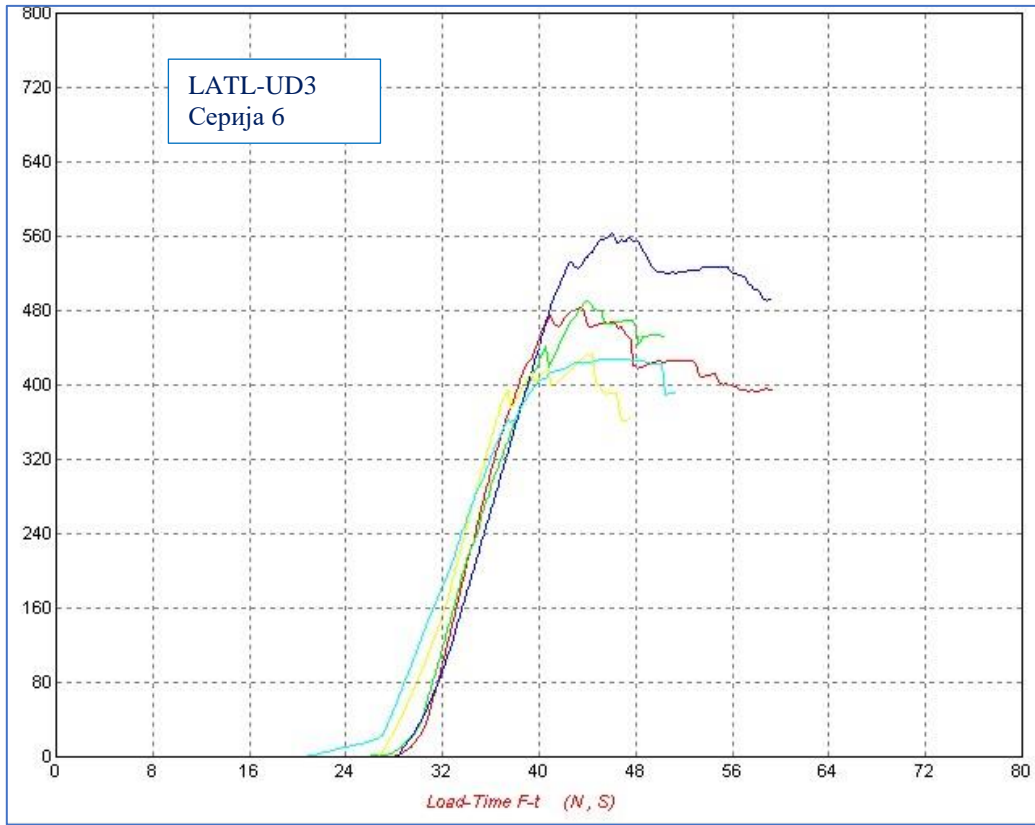
N	\bar{y}	y_p	$(\bar{y} - y_p)$	$(\bar{y} - y_p)^2$
1	1138,67	1084,09	54,56	2979,48
2	975,20	948,09	27,11	734,92
3	990,69	1084,09	-93,39	8722,07
4	959,78	948,09	11,70	136,85
5	973,42	982,13	-8,71	75,86
6	764,03	846,13	-82,11	6741,93
7	1029,65	982,13	47,517	2257,91
8	889,44	846,13	43,32	1875,05
$\sum_{j=1}^N (\bar{y} - y_p)^2 =$				23524,06

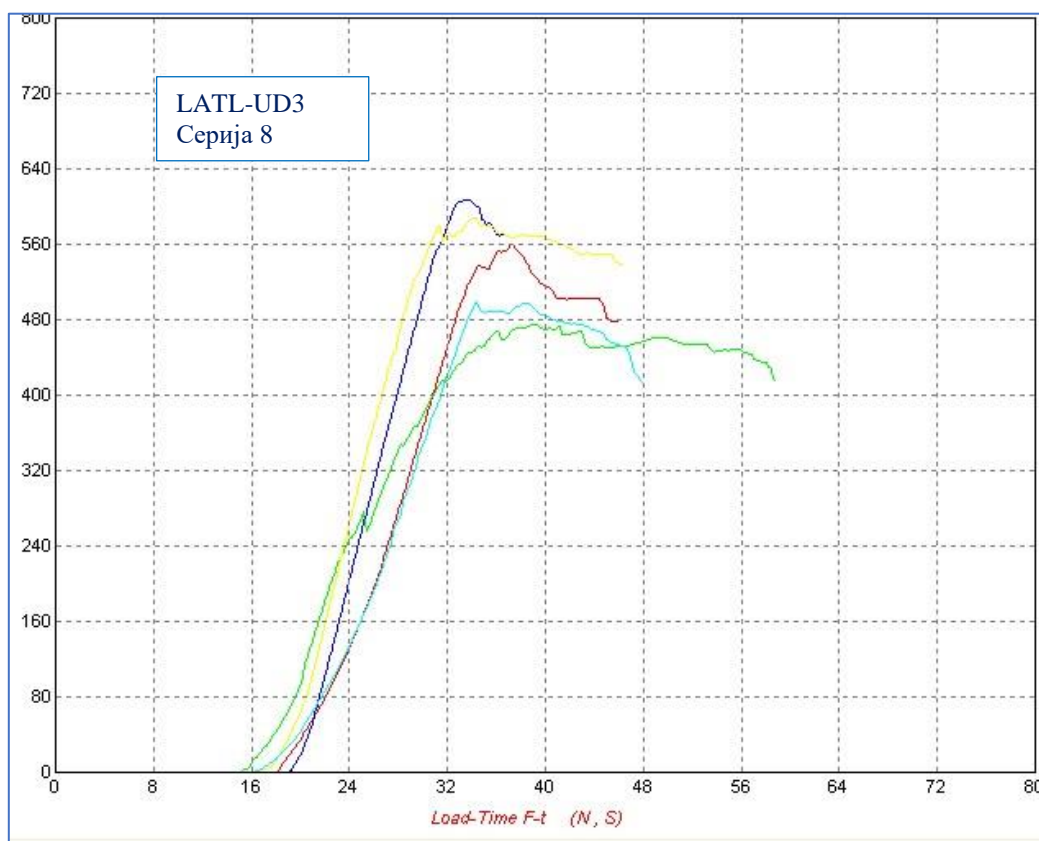
На слика 7.20 дадени се добиените дијаграми сила – време ($N, sek.$) од тестирањата на примероците LATL-UD3 од серија 1 до серија 8.











Слика 7.20. Добиени криви сила – време ($N, sek.$) од тестирање на ламинатните плочи LATL UD3 од серија 1 до серија 8

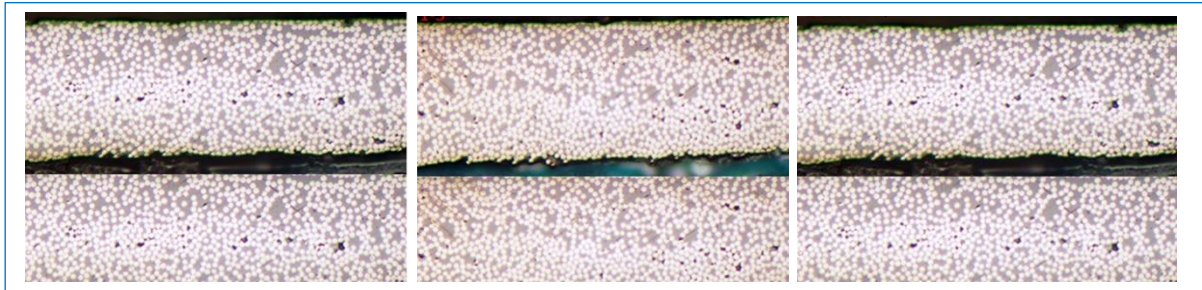
Добиените дијаграми сила – време ($N, sek.$) за сите осум примероци на ламинатни плочи добиени при различни услови го покажуваат истото однесување како и примероците со ознаки LATL UD1 и LATL UD2. Кривите линеарно растат со зголемување на применетата сила при свиткување на епруветите се до нарушување на структурата на ламинатниот примерок, а потоа ослабнатиот дел продолжува да се спротивставува на силата уште извесно време, после што настанува кршење на епруветата. Брзината со која силата дејствува на површината на епруветата е 5 mm/min , а со зголемување на силата расте отпорот што го дава примерокот кој се тестира, така што, применета е сила од $500N$ до $1100N$ за време од неколку секунди во зависност од тоа која серија од примероците се тестира. За секој тип на ламинатна плоча направено е тестирање на серија од пет примероци земени од различни области од ламинатната плоча, а резултатите односно добиените криви од една серија (пет тестирања) се дадени во еден дијаграм и се претставени со различна боја, како што се добиваат од

универзалната машина за тестирање. Добиените вредности за напрегање при свиткување за примероците со ознака LATL UD3 за серија 1 до серија 8 се приближно исти како примероците со ознака LATL UD2. Примероците со ознаки LATL UD2 и LATL UD3 се добиени од исти тип на унидирекционални препрег ленти врз основа на јаглородни влакна и термопластична матрица РЕЕК, но од различни производители. Поради тоа што има некои отстапувања во карактеристиките на двата препрег материјали, направен е план на експеримент и за примероците со ознака LATL UD3. Добиената регресиона равенка го покажува истото влијание на факторите врз одзивот и кај овој тип на ламинатни плочи. Примероците ламинатни плочи кои се добиени на високо ниво на трите анализирани фактори покажаа највисоки вредности за напрегање при свиткување. Исто така, високи вредности покажаа и примероците ламинатни плочи добиени кога на високо ниво се температурата на ласер и притисокот на валјачето, а аголот на ласер е на ниско ниво. Тоа покажува дека при повисока температура на процесирање, повисок притисок на компакција и при поставеност на ласер на поголем и помал агол односно при различна распределба на ласерските зраци на лентата и на ламинатот, доаѓа до добро поврзување на слоевите што резултира со високи вредности за напрегање при свиткување на ламинатните плочи. Додека, кога притисокот на валјаче и температурата на процесирање се на долно ниво, а аголот под кој паѓаат ласерските зраци е поголем или помал се добиваат послаби карактеристики на ламинатните плочи. Тогаш, применетата температура овозможува интердифузија на полимерните молекули меѓутоа притисокот на валјачето не е доволно голем за да може да ги израмни нерамнините од препрег лентите и да направи компакција на заробените празнини меѓу слоевите. Затоа, напрегањето при свиткување кај тие примероци е многу помало. Особено е забележано поголемо отстапување за напрегање при свиткување кај примероците од серија 6. Вакви заклучоци се добиени и за примероците ламинатни плочи со ознаки LATL UD1 и LATL UD2.

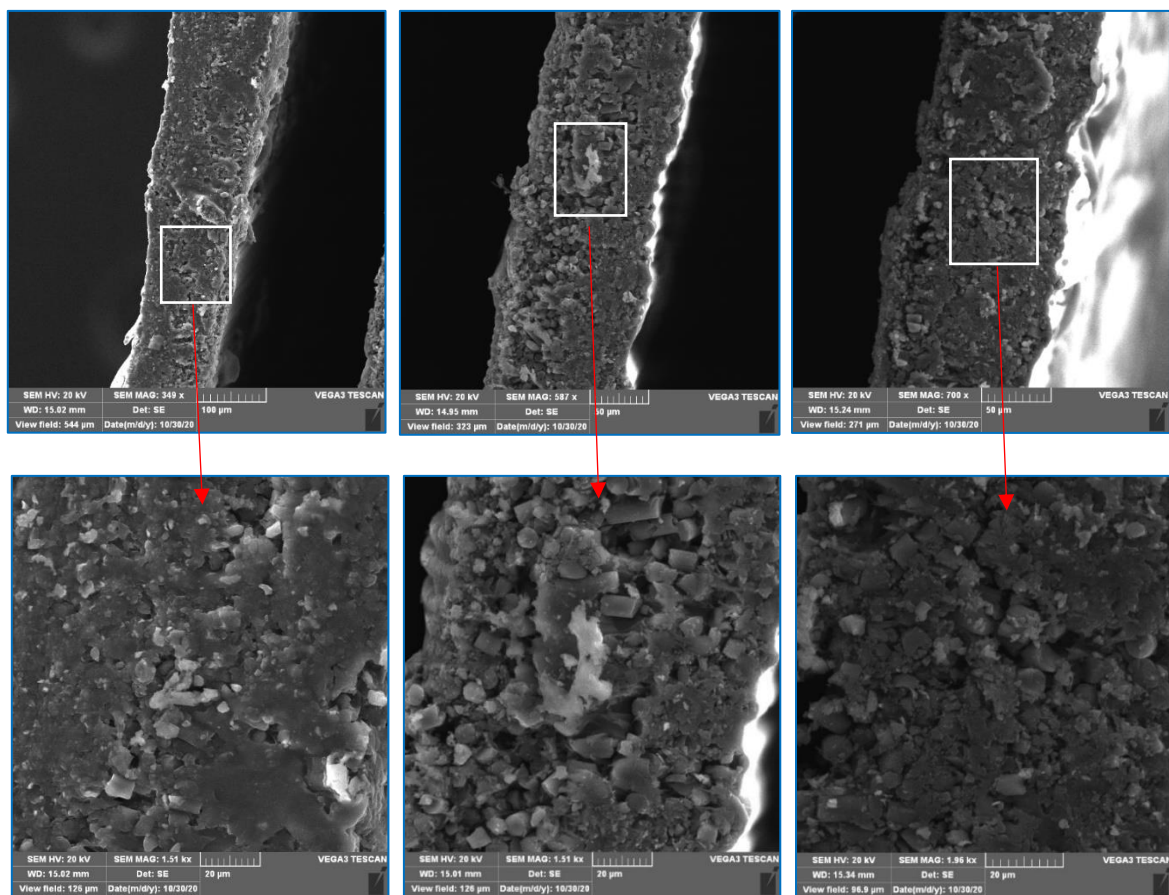
7.2.6. Микроскопски анализи за ламинатните примероци LATL-UD3

На слика 7.21 даден се снимки од оптички микроскоп на примероци од унидирекционалниот препрег UD3. Направени се шест снимки на попречен пресек од препрег лентата со зголемување од 200 пати, а од добиените слики јасно се забележува дека препрег лентата има нерамнини на површината и присуство на воздушни меурчиња. Од направените снимки на оптички микроскоп и со примена на софтвер

определено е дека процентот на пори за UD3 изнесува 0,172, добиен како средна вредност од процентот на пори во сите шест снимени примероци.



Слика 7.21. Оптички снимки на попречен пресек на унидирекционална препрег лента UD3



Слика 7.22. СЕМ снимки на унидирекционална препрег лента UD3

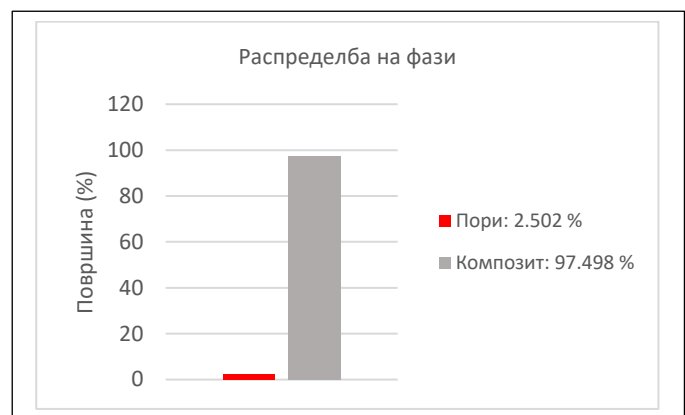
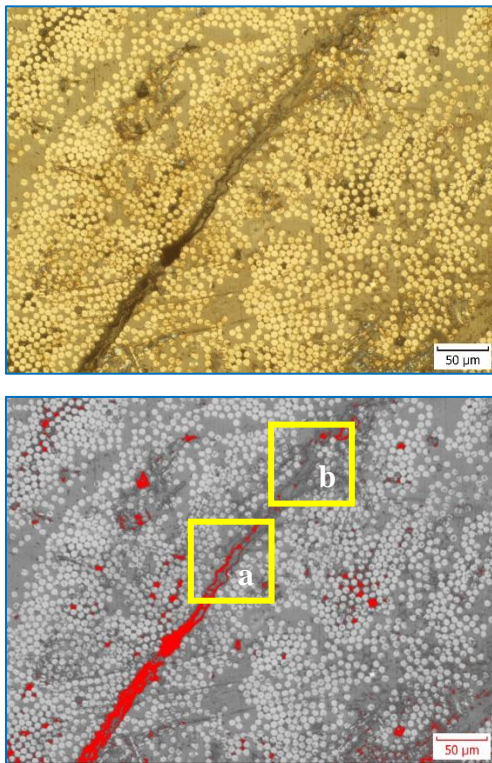
Присуството на пори и одредени нерамнини на површината на препрегот може појасно да се забележат од направените снимки на истите примероци со скениралчка

електронска микроскопија. На слика 7.22 се прикажани некои СЕМ слики каде што е забележано некаква неправилност во структурата. Првите слики се со зголемување до 700 пати, а сликите подолу се делови од снимките со зголемување 1900 пати. Може да се забележи дека во самата препрег лента постои на одредени места промена во насоката на влакната проследена со празнини околу нејзе. Меѓутоа, јасно се гледа дека влакната се импрегнирани со термопластична матрица и постигната е добра интраламинарна поврзаност. Исто така, јасно се забележува присуство на термопластична матрица на површината на препрег лентата што претставува добар предуслов за добивање на добара врска меѓу слоевите. Интраламинарна празнина се појавува за време на импрегнацијата на лентата и е вградена во лентата, додека меѓуламинарната празнина е главно резултат на процесот на полагање на лента. Преку микрографски снимки на влезна препрег лента и на готов ламинат добиен од тој препрег, направени во истражувањата на Gruber et al. [67], не е забележана никаква промена во фракцијата на празнини, ниту во нивната форма или големина. Врз основа на тоа тие заклучиле дека ATL/AFP процесот не е во состојба да ја намали содржината на интраламинарната празнина. Преку процесот на автоматизирано полагање на лентите и примената на соодветен компакционен притисок на валјаче, кога лентата и ламинатот се доволно загреани се очекува да дојде до израмнување на нерамнините во препрегот и компакционирање на заробените воздушни меурчиња меѓу слоевите.

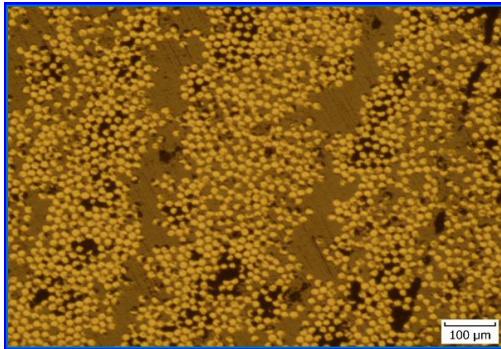
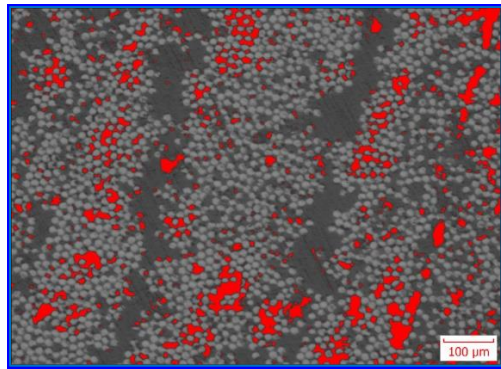
Добра поврзаност меѓу слоевите се забележува кај примероците ламинатни плочи со ознака LATL-UD3 серија 1 и LATL-UD3 серија 3, кои покажаа и највисоки вредности за напрегање при свиткување. Од направените металографски снимки на попречните пресеци на примероците определен е процентот на пори кој за примероците за серија 1 не е поголем од 2%, додека за примероците од серија 3 е малку поголем, односно 2,5%. На слика 7.23 дадени се металографски снимки добиени од оптички микроскоп за LATL-UD3 серија 3. Од добиените снимки забележано е дека на некои места постои недоволно поврзување на дел од слоевите што може да е резултат на недоволна температура при полагање на тој дел од лентата или пак непостоење на доволно добар слој на термопластична матрица на горната површина на добиениот препрег. Ваквите неправилности кои се забележаа кај примероците од серија 3 не се во континуитет по целата површина од добиената ламинатна плоча, туку се примероци кои се отсечени од почетокот на плочата. СЕМ снимките на делови од тие примероци од серија 3 направени со зголемување од 1300 пати, а прикажани на слика 7.24 б), покажуваат постоење на

празнини кои се со одредена должина во областа на интерфејсот. Направени се СЕМ снимки и на некои издвоени делови од примероците од серија 1. Кај нив нема појава на неправилности. Постигнато е добро интерламинарно поврзување така што не може да се забележи граница меѓу слоевите туку како да е еден материјал. На сликата 7.20 а) снимката десно се гледаат мали пори кои по димензии не се ни колку дијаметарот на влакната што значи, присуството на такви пори може да се должи на интраламинарна празнина во препрег лентата. Поголем процент на пори е забележан кај примероците добиени на пониска температура на процесирање и на понизок притисок на валјаче односно кај примероците од серија 6. Кога двата највлијателни фактори при автоматизираниот процес на поставување на лента се на долно ниво тогаш не доаѓа до добро поврзување на слоевите и формирање на добра врска меѓу нив. Температурата на процесирање иако е на пониско ниво сепак овозможува топлотно движење на полимерните молекули и направена е добра автохезија што јасно се гледа на оптичката снимка. Тоа се регионите со сива боја кои се всушност и граница меѓу слоевите. Меѓутоа од снимките се забележуваат поголем број воздушни празнини што значи дека не е постигната консолидација поради помалиот притисок на валјаче. На СЕМ снимката дадена на слика 7.20. б) даден е еден дел од попречниот пресек на примерокот сниман со оптички микроскоп каде јасно може да се види појавата на празнини, но исто така јасно се забележува и постоењето на термопластичната матрица околу издвоените влакна во празнините. За да може да дојде до поголема консолидација и истиснување на празнините потребно е да се примени помала брзина на полагање на лентите. Тогаш слоевите ќе бидат подолго време под притисок во *nip* точката, а со тоа ќе се намалат празнините, но процесот ќе биде побавен и помалку продуктивен. Tierney i Gillespie [80] ја испитувале интерламинарната динамика на празнини со примена на микроскопски и макроскопски модели на консолидација на празнини и деконсолидација првично развиени од Ranganathan et al. [81]. Тие ги проверувале моделите со експериментални резултати и добиле добра корелација помеѓу моделите и експерименталните податоци добиени од микрографските анализи. Врз основа на истражувањата заклучиле дека доминантен фактор што влијае на процесот е деконсолидацијата на празнини во *nip* точката на поврзување. Деконсолидацијата се јавува кога температурата на матрицата останува над T_g откако ќе се ослободи компакциониот притисок. За да се спречи деконсолидација на празнините, се предлага да се лади бавно [80] или да се излади ламинатот под T_g пред да се ослободи притисокот или да се примени помала брзина на

полагање на лентите [81]. Ваков е заклучокот и од нашите истражувања, а се совпаѓа и со заклучоците за примероците со ознаки LATL-UD1 и LATL-UD2 од серија 6. Имено, примероците со ознака LATL-UD2 и LATL-UD3 кои се врз основа на исти конституенти само од различни производители покажаа исто однесување при исти услови на процесирање.

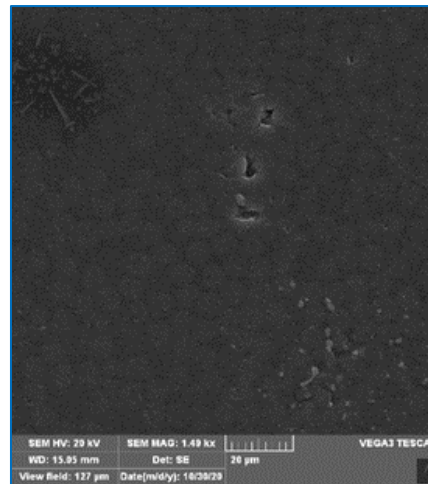


a) LATL-UD3 серија 3

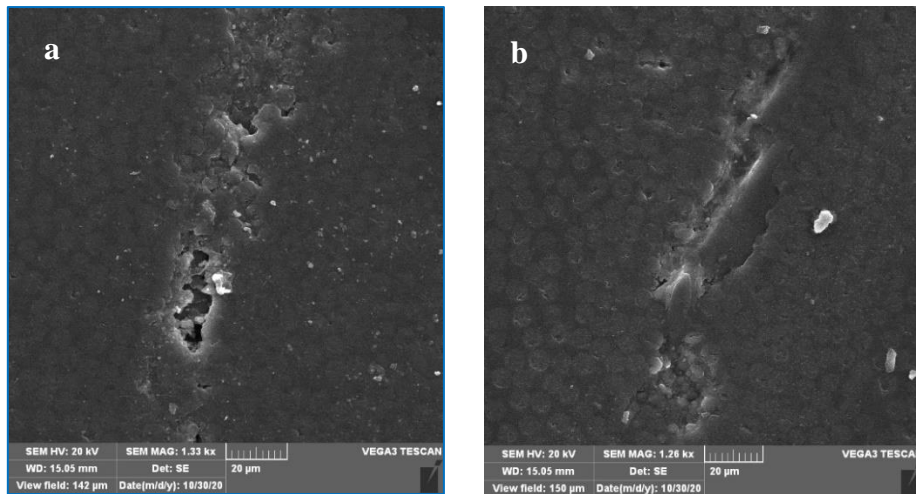


б) LATL-UD3 серија 6

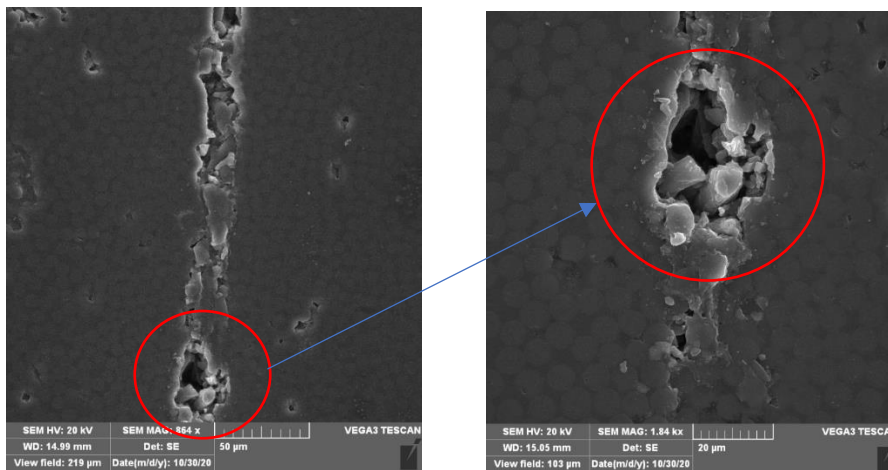
Слика 7.23. Металографски снимки од оптички микроскоп на попречен пресек на примероци ламинатни плочи со ознака LATL-UD3 а) серија 3; б) серија 6



а) LATL UD3 серија 1



б) LATL UD3 серија 3



в) LATL UD3 серија 6

Слика 7.24. SEM снимки на примероци со ознака LATL UD3 а) серија 1; б) серија 3; в) серија 6

7.2.7. Одредување на добиените регресиони равенки за примероци со ознака LATL-UD1, LATL-UD2 и LATL-UD3 во инженерски единици

Добиените регресиони равенки за сите три типови на ламинатни плочи со ознаки LATL-UD1, LATL-UD2 и LATL-UD3 покажаа дека најголемо е влијанието на првиот и третиот фактор односно на температурата на процесирање и на компакциониот притисок на валјачето, а многу помало е влијанието на третиот фактор односно на аголот на поставување на ласерскиот уред. Исто така, добиените равенки покажаа дека постои и интеракција меѓу факторите која помалку или повеќе влијае врз одзивот на функцијата во зависност од условите на процесирање применети според планот на експериментот.

Добиените регресиони равенки се со кодирани варијабли. Во рамките на истражувањата од докторската дисертација направена е конверзија на добиените регресиони равенки за трите типови ламинатни плочи, од кодирани во инженерски варијабли преку равенката (6.9) и табела 6.3 и табела 6.4. За секој од трите фактори извршена е соодветна замена на кодираните фактори (мало x) во вистинските инженерски (големо X).

За ламинатните полочи со ознака LATL UD1 равенката во инженерски единици ќе биде:

$$y_p = 936,80 + 31,70 \cdot \frac{X_1-370}{10} - 1,47 \cdot \frac{X_2-23,5}{1,5} + 42,56 \cdot \frac{X_3-320}{50} + 3,31 \cdot \frac{X_1-370}{10} \cdot \frac{X_2-23,5}{1,5} + 13,09 \cdot \frac{X_1-370}{10} \cdot \frac{X_3-320}{50} + 11,38 \cdot \frac{X_2-23,5}{1,5} \cdot \frac{X_3-320}{50} - 0,57 \cdot \frac{X_1-370}{10} \cdot \frac{X_2-23,5}{1,5} \cdot \frac{X_3-320}{50} \quad (7.3)$$

За ламинатните полочи со ознака LATL UD2 равенката во инженерски единици ќе биде:

$$y_p = 956,11 + 68,00 \cdot \frac{X_1-450}{30} - 2,28 \cdot \frac{X_2-23,5}{1,5} + 50,98 \cdot \frac{X_3-457,5}{72,5} + 25,1 \cdot \frac{X_1-450}{30} \cdot \frac{X_2-23,5}{1,5} - 19,40 \cdot \frac{X_1-450}{30} \cdot \frac{X_3-457,5}{72,5} + 43,13 \cdot \frac{X_2-23,5}{1,5} \cdot \frac{X_3-457,5}{72,5} + 7,92 \cdot \frac{X_1-450}{30} \cdot \frac{X_2-23,5}{1,5} \cdot \frac{X_3-457,5}{72,5} \quad (7.4)$$

За ламинатните полочи со ознака LATL UD3 равенката во инженерски единици ќе биде:

$$y_p = 1000,14 + 87,02 \cdot \frac{X_1-450}{30} - 14,03 \cdot \frac{X_2-23,5}{1,5} + 94,57 \cdot \frac{X_3-457,5}{72,5} + 35,50 \cdot \frac{X_1-450}{30} \cdot \frac{X_2-23,5}{1,5} - 21,98 \cdot \frac{X_1-450}{30} \cdot \frac{X_3-457,5}{72,5} - 24,77 \cdot \frac{X_2-23,5}{1,5} \cdot \frac{X_3-457,5}{72,5} - 24,48 \cdot \frac{X_1-450}{30} \cdot \frac{X_2-23,5}{1,5} \cdot \frac{X_3-457,5}{72,5} \quad (7.5)$$

Ако во добиените равенки во инженерски единици замениме било која вредност за факторите во инженерски единици и тоа во опсегот што е предмет на испитување, ќе го добиеме одзивот т.е. ќе добиеме вредност за испитуваната карактеристика напрегање при свиткување без притоа да правиме експеримент. На овој начин може да се заклучи дека преку планирање на експерименти за автоматизираните процеси и добивањето на регресиони равенки со кодирани варијабли како и преку равенките во инженерски единици, овозможено е добивање на максимален број на информации со минимален број на проби за предвидување на одзивот во испитуванот опсег.

За да се направи валидација на добиените модели кои ги опишуваат автоматизираните процеси односно за да се проверат регресионите равенки, направена е теоретска пресметка на напрегањата при свиткување на различни услови во предвидениот опсег на истражувањето, а потоа истите тие се проверени и експериментално. Теоретски направена е пресметка за напрегање при свиткување за ламинатни плочи добиени на различна температура на процесирање: 420°C, 440°C, 460°C, 480°C, со постојан притисок на валјаче од 530N и постојан агол на поставеност на ласер од 22° со соодветна замена во равенките (7.3), (7.4) и (7.5) за трите типови ламинатни плочи.

За ламинатните плочи со ознака LATL UD1, за различни температури на процесирање, теоретската пресметка за напрегање при свиткување е следната:

$$\begin{aligned}
 y_{p_1} &= 936,80 + 31,70 \cdot \frac{420 - 370}{10} - 1,47 \cdot \frac{22 - 23,5}{1,5} + 42,56 \cdot \frac{530 - 320}{50} + 3,31 \\
 &\quad \cdot \frac{420 - 370}{10} \cdot \frac{22 - 23,5}{1,5} + 13,09 \cdot \frac{420 - 370}{10} \cdot \frac{530 - 320}{50} + 11,38 \\
 &\quad \cdot \frac{22 - 23,5}{1,5} \cdot \frac{530 - 320}{50} - 0,57 \cdot \frac{420 - 370}{10} \cdot \frac{22 - 23,5}{1,5} \cdot \frac{530 - 320}{50} \\
 &= \mathbf{939,21}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y_{p_2} &= 936,80 + 31,70 \cdot \frac{440 - 370}{10} - 1,47 \cdot \frac{22 - 23,5}{1,5} + 42,56 \cdot \frac{530 - 320}{50} + 3,31 \\
 &\quad \cdot \frac{440 - 370}{10} \cdot \frac{22 - 23,5}{1,5} + 13,09 \cdot \frac{440 - 370}{10} \cdot \frac{530 - 320}{50} + 11,38 \\
 &\quad \cdot \frac{22 - 23,5}{1,5} \cdot \frac{530 - 320}{50} - 0,57 \cdot \frac{440 - 370}{10} \cdot \frac{22 - 23,5}{1,5} \cdot \frac{530 - 320}{50} \\
 &= \mathbf{969,60}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y_{p_3} &= 936,80 + 31,70 \cdot \frac{460 - 370}{10} - 1,47 \cdot \frac{22 - 23,5}{1,5} + 42,56 \cdot \frac{530 - 320}{50} + 3,31 \\
 &\quad \cdot \frac{460 - 370}{10} \cdot \frac{22 - 23,5}{1,5} + 13,09 \cdot \frac{460 - 370}{10} \cdot \frac{530 - 320}{50} + 11,38 \\
 &\quad \cdot \frac{22 - 23,5}{1,5} \cdot \frac{530 - 320}{50} - 0,57 \cdot \frac{460 - 370}{10} \cdot \frac{22 - 23,5}{1,5} \cdot \frac{530 - 320}{50} \\
 &= \mathbf{997,90}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_{p_4} &= 936,80 + 31,70 \cdot \frac{480 - 370}{10} - 1,47 \cdot \frac{22 - 23,5}{1,5} + 42,56 \cdot \frac{530 - 320}{50} + 3,31 \\
&\quad \cdot \frac{480 - 370}{10} \cdot \frac{22 - 23,5}{1,5} + 13,09 \cdot \frac{480 - 370}{10} \cdot \frac{530 - 320}{50} + 11,38 \\
&\quad \cdot \frac{22 - 23,5}{1,5} \cdot \frac{530 - 320}{50} - 0,57 \cdot \frac{480 - 370}{10} \cdot \frac{22 - 23,5}{1,5} \cdot \frac{530 - 320}{50} \\
&= \mathbf{1021,81}
\end{aligned}$$

На исти начин теоретски се пресметани напрегањата при свиткување, y_p и за примероците со ознака LATL UD2 и LATL UD3.

Потоа, со тие услови произведени се примероци на ламинатни плочи и истите се тестирани. Добиените теоретски пресметани резултати и експериментално добиени за трите типови ламинатни плочи со ознаки LATL UD1, LATL UD2 и LATL UD3 се дадени во табела 7.14 а), б) и в) и на слика 7.25 а), б) и в). Ваква споредба може да се направи за било кои други вредности за температурата на процесирање, притисок на валјачето и аголот на поставеност на ласер во рамките на истражуваниот домен.

Врз основа на добиените резултати дадени во табела 7.14 може да се забележи дека не постои голема разлика на вредностите за напрегање при свиткување добиени со теоретската пресметка преку добиените регресиони равенки во споредба со вредностите добиени од експерименталните тестирања на примероци произведени на тие услови.

Најголемо отстапување од пресметаните вредности се забележува кај ламинатните плочи со ознака LATL UD1 и LATL UD2 добиени на процесна температура од 480°C. На таа температура остварена е добра интердифузија на полимерните вериги меѓу слоевите и остварен е добар интимен контакт и добро поврзување. Меѓутоа, како резултат на повисоката температура настанато е заробување на воздух во матрицата и појава на пори кои што претставуваат дефекти што влијаат на добивање на пониски вредности при тестирање на напрегање при свиткување. Порите и дефектите што се појавуваат при експериментирањето не се земени во теоретските пресметки и затоа пресметаните вредности се повисоки од експериментално добиените. Најголемите отстапувања на експериментално добиените вредности се помалку од 10% од теоретски пресметаните вредности според добиените регресиони равенки. Тоа се очекувани и прифалтливи отстапувања што покажува дека добиените регресиони равенки може да се применуваат за предвидување на својствата на ламинатните плочи.

Табела 7.14. Пресметани вредности за напрегање при свиткување според добиените регресиони равенки и експериментално добиени вредности

a) LATL UD1

LATL-UD1	Процесна температура, ° C	Напрегање при свиткување $\sigma_{sr.}$ (MPa)	
		<i>пресметано, y_p</i>	<i>експеримент</i>
	420	939,21 (y_{p1})	927,41
440	969,60 (y_{p2})	968,96	
460	997,90 (y_{p3})	1008,90	
480	1021,81 (y_{p4})	1011,51	

б) LATL UD2

LATL-UD2	Процесна температура, ° C	Напрегање при свиткување $\sigma_{sr.}$ (MPa)	
		<i>пресметано, y_p</i>	<i>експеримент</i>
	420	974,04	959,78
440	1037,44	998,96	
460	1089,84	1029,90	
480	1152,10	990,69	

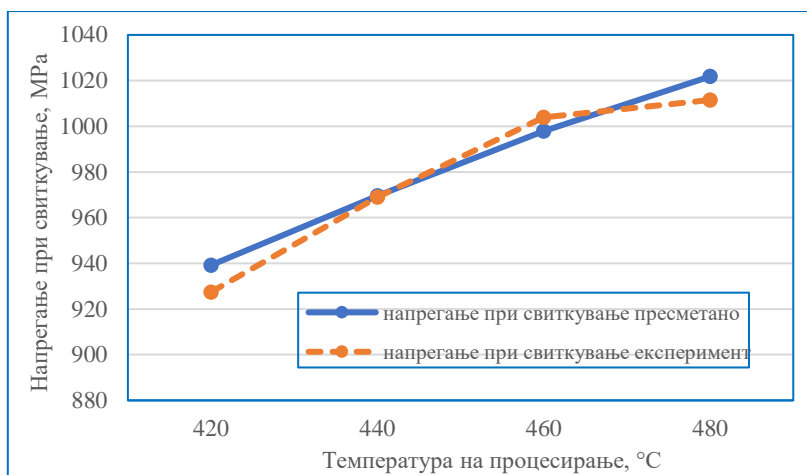
в) LATL UD3

LATL-UD3	Процесна температура, ° C	Напрегање при свиткување $\sigma_{sr.}$ (MPa)	
		<i>пресметано, y_p</i>	<i>експеримент</i>
	420	1006,11	938,85
440	1064,07	998,96	
460	1122,07	1169,90	
480	1180,10	1159,3	

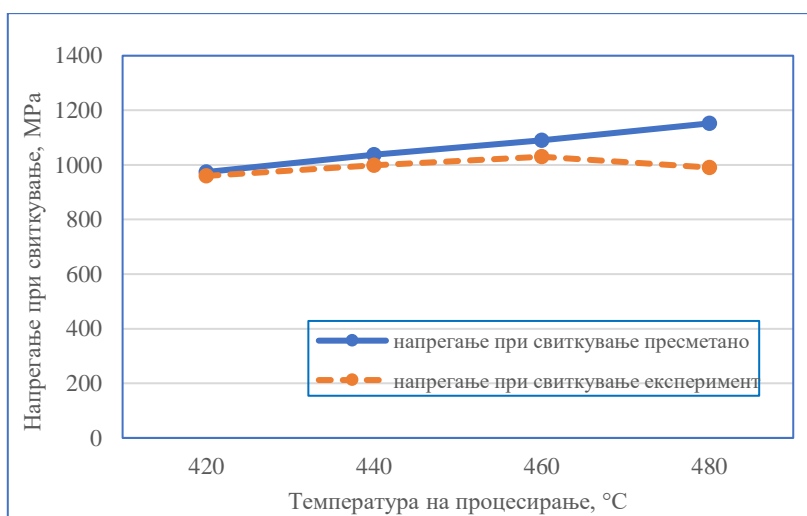
На слика 7.25 графичи се претставени пресметаните и експериментално добиените вредности за напрегање при свиткување за трите типови ламинатни плочи со ознаки LATL UD1, LATL UD2 и LATL UD3. Како што може да се види од слика 7.21 за сите три примероци постои добро совпаѓање помеѓу пресметаните и експерименталните вредности. Сите пресметани вредности се претставени со права линија што е во согласност со претпоставениот модел од прв ред на експериментите. Експериментално

добиените вредности се наоѓаат во близина на пресметаните. Експериментално добиените вредности се пониски во споредба со пресметаните, што се должи на дефекти во структурата односно одреден процент на пори што се појавуваат при процесирањето, што не е земен во пресметките. Врз основа на пресметаните вредности за напрегање при свиткување со експериментално добиените може да се заклучи дека доколку доменот на истражување е прецизно определен, полниот факторен план на експерименти дава добро приближување до одзивот на функцијата односно во нашите истражувања напрегањето при свиткување.

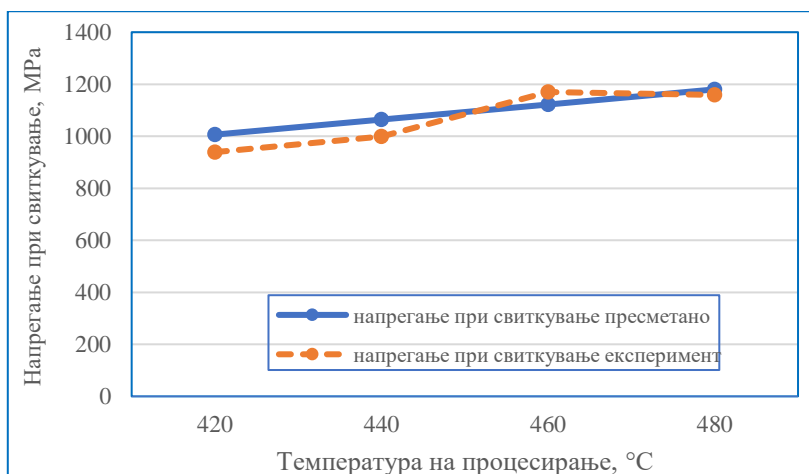
Врз основа на добиените регресиони равенки во инженерски променливи можеме да направиме дизајн на композити. Тоа значи дека, за дадено барање за напрегање при свиткување, со замена на y_p , во равенките (7.3), (7.4) и (7.5), може да се пресмета процесната температурата која треба да се користи при полагањето на лентите. Исто така, y_p т.е. вредностите за напрегање при свиткување, може да се пресметаат за дадена процесна температура (фактор X_1). Но и во двата горенаведени случаи, аголот на поставеност на ласерот и притисокот на валјаче мора да бидат постојани. Добиените регресиони равенки во инженерски променливи даваат можност за дадено барање за напрегање при свиткување да се пресмета и друг фактор, на пример притисокот на валјаче или третиот фактор или обратно, напрегање при свиткување да се пресмета за даден втор или трет фактор. Добиените регресиони равенки добро ги опишуваат автоматизираните ATL/AFP постапки и може да се користат за предвидување на напрегање при свиткување во предвидениот опсег на истражување за ламинатните плочи.



a) LATL UD1



б) LATL UD2



в) LATL UD3

Слика 7.25. Напрегање при свиткување во однос на температурата на процесирање – теоретски пресметани и експериментално добиени вредности

7.3. Добиени резултати за напрегање при свиткување на примероци ламинатни плочи со ознака LAFP-UD3 добиени со AFP постапка

Во рамките на истражувањата во оваа докторска дисертација произведени се примероци ламинатни плочи од UD3 препрег ленти со AFP постапката. Кај оваа постапка, AFP главата има 4 калемии со ленти препрег со помала широчина од 6,35 mm кои формираат еден курс со широчина од 25,4 mm, а шест такви курсеви формираат еден слој односно една ламина, како што е претсавено на слика 6,6 од Глава 6.3 од експерименталниот дел. Произведени се примероци ламинатни плочи со услови на полагање при кои беа добиени најдобри карактеристики за UD3 препрег ленти со ATL постапка. Во табела 7.15 дадени се димензиите на подготвените тест епрувети и добиените резултати од направените тестирањата за максималната сила при свиткување до кршење на епруветите и за напрегање при свиткување. На слика 7.26 дадени се некои од добиените дијаграми сила – време, добиени при тестирање на примероците LAFP-UD3 од универзалната машина за тестирање, а останатите дијаграми се дадени во прилог 4 од овој докторски труд. Добиените дијаграми покажуваат исто однесување на примероците како и при тестирање на другите примероци ламинатни плочи. Имено, постои линеарен раст на силата со време се додека не дојде до ослабнување на некој од слоевите, а потоа ослабнатиот примерок продолжува да се спротивставува на приложената сила се додека не дојде до комплетно негово кршење.

Во табела 7.16 дадени се средните вредности од добиените напрегања при свиткување за сите примероците од 1 до 4 со ознака LAFP-UD3 и за примероците со ознака LATL UD3 добиени при исти услови и од ист унидирекционален препрег ленти. Графички споредбените резултати се претставени на слика 7.27. Добиените резултати покажуваат дека примероците ламинатни плочи добиени со AFP постапката имаат послаби карактеристики во споредба со примероците ламинатни плочи добиени на исти услови со ATL постапка. Кога повеќе ленти препрег се полагаат истовремено формирајќи курс постои можност за појава на неправилности како што се празнини и преколпувања и нема континуитет на ширината на курсот. Тоа резултира со дефекти во микроструктурата и во добивање на пониски вредности за напрегање при свиткување на примероците. Примероците добиени со AFP постапка имаат пониски вредности за напрегање при свиткување и тоа за околу 25% од тие добиени при исти услови со ATL постапката. Имено, примена на повисока температура на процесирање и повисок

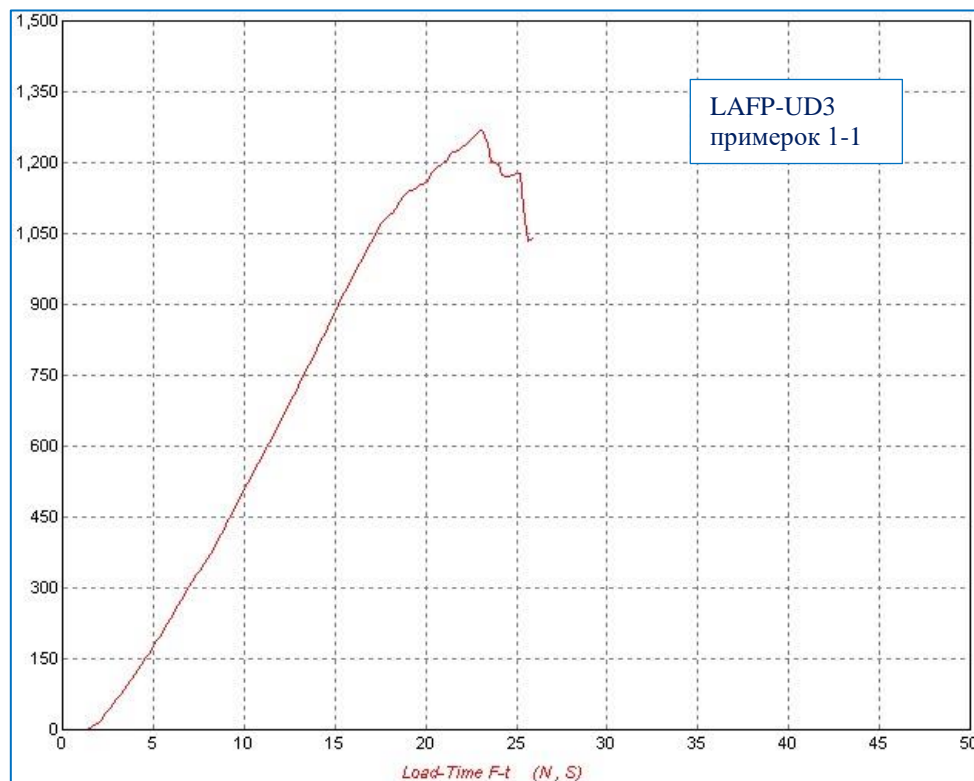
притисок при паѓање на ласерските зраци под помал или поголем агол резултира во формирање на добра врска меѓу слоевите. Примероците добиени со помал притисок и повисока температура на процесирање како и тие добиени на пониска температура, а повисок притисок покажаа пониски вредности за напрегање при свиткување. Тие примероци имаат и поголем процент на пори што јасно се гледа од добиените металографски снимки од оптичкиот микроскоп. Металографските снимки на попречните пресеци на примероците 1 и 4 дадени се на слика 7.28, а СЕМ снимките на попречни пресеци на истите примероци се дадени на слика 7.29. Од направените снимки на оптички микроскоп и пресметаниот процент на пори може да се забележи дека ламинатните примероци добиени со AFP постапка имаат поголем процент на пори. Примероците добиени на повисока температура на процесирање и повисок притисок на валјаче покажаа содржина на пори околу 8% додека примероците добиени на пониска температура на процесирање и повисок притисок на валјаче и обратно покажаа содржина на пори околу 10%. Тоа јасно покажува дека AFP постапка резултира во ламинатни плочи со послаби карактеристики заради појавувањето на неправилности дополнително при формирањето на курсевите од четирите тесни ленти препрег кои се полагаат истовремено на рамна површина. На СЕМ снимките забележани се пори со поголеми димензии, а на одредени делови и промена на структурата на термопластичната матрица заради повисоката температура на процесирање или аголот под кој паѓаат ласерските зраци. Кај примероците со ознака 4 забележан е празен простор со поголема должина што наликува на пукнатина, слика 7.29 б). Истиот тој дел е зголемен и до 3000 пати, сликата десно, каде јасно се гледа дека нема постигнато добра врска меѓу слоевите и не постои добра автохезија меѓу нив. Поради тоа, процентот на пори во тие примероци е поголем, а механичките карактеристики послаби. Тие примероци се добиени со пониска температура на процесирање, што покажува дека на одредени места во примероците нема доволно топлоотно движење на полимерните молекули и не е остварена интердифузија, а со тоа не е направен добар интерфејс меѓу слоевите.

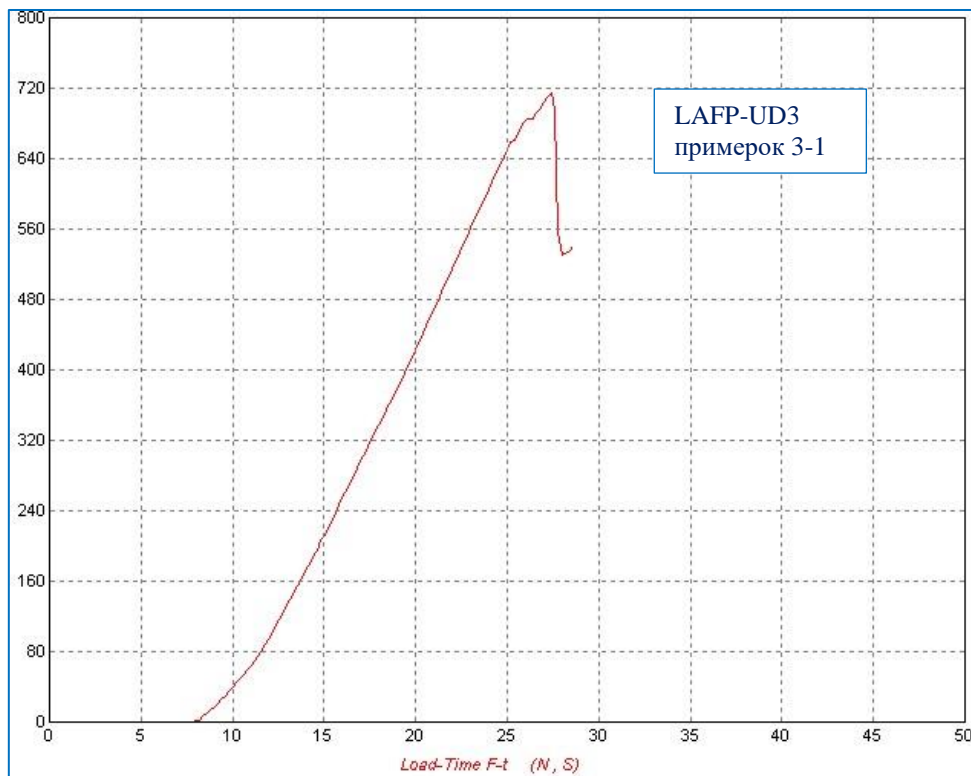
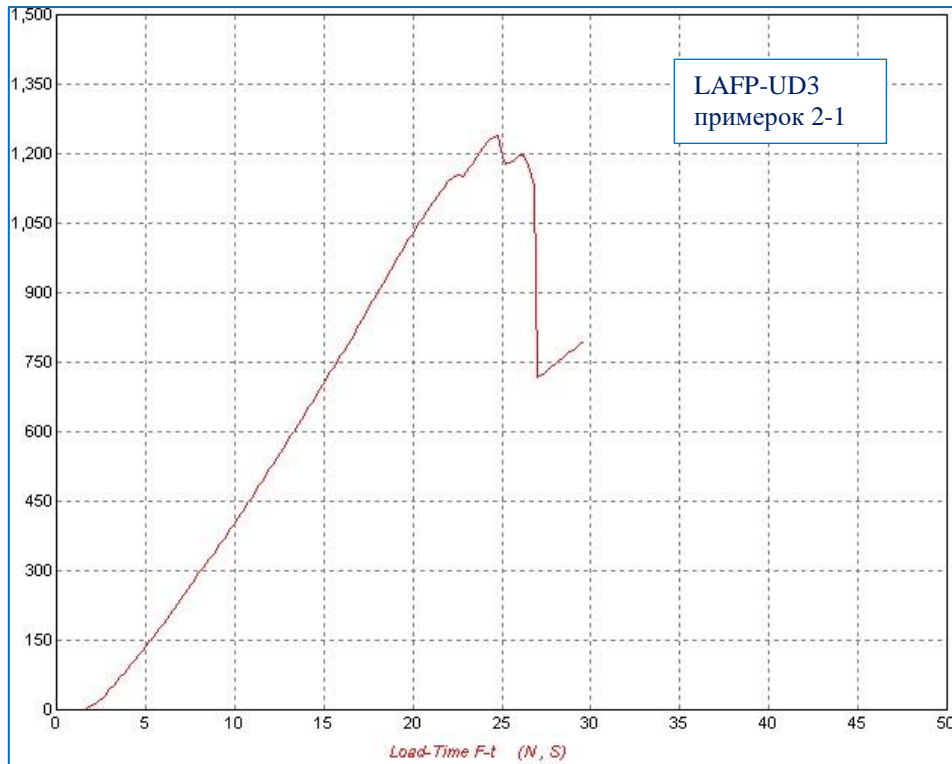
Табела 7.15. Резултати добиени за напрегање при свиткување за примероци LAFP-UD3

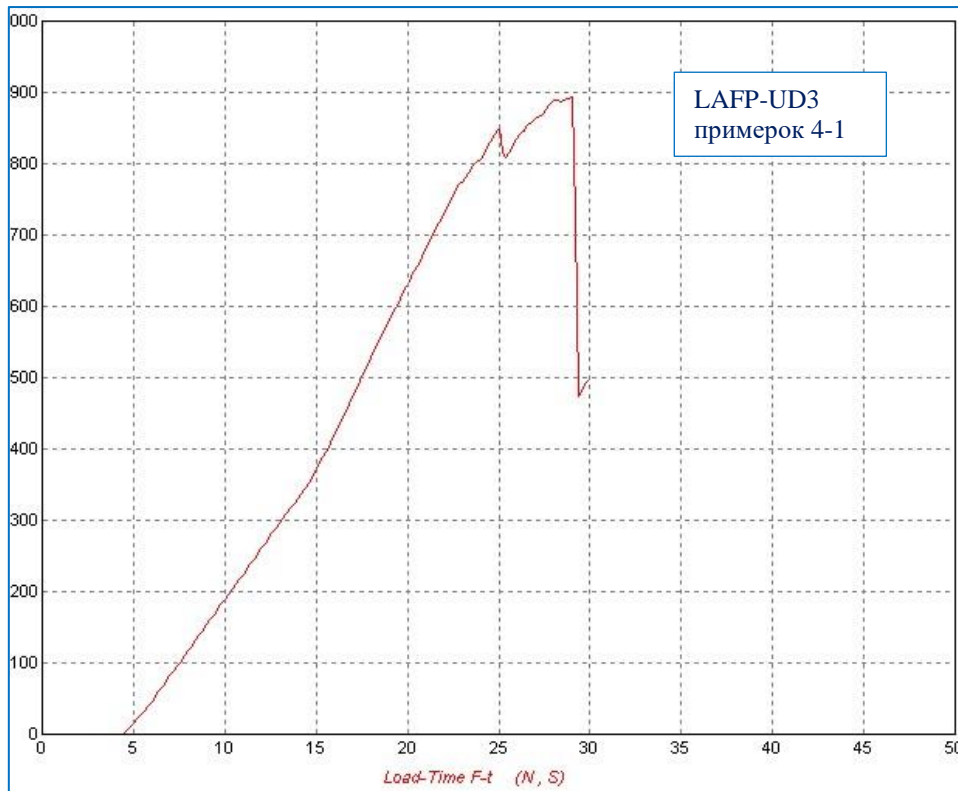
Ознака на примероците		Ширина b (mm)	Дебелина d (mm)	F (N)	σ (MPa)	σ_{sr} (MPa)
LAFP-UD3						
1 T= 480°C P=530N $\alpha = 25^\circ$	1-1	15,20	1,95	1267,1	1150,95	1016,53
	1-2	15,91	1,93	1058,5	938,29	
	1-3	16,01	2,07	1219,8	934,09	
	1-4	15,80	2,00	1200,4	997,17	
	1-5	15,94	1,99	1277,1	1062,16	
2 T= 480°C P=530N $\alpha = 22^\circ$	2-1	15,75	2,11	1238,8	927,50	905,45
	2-2	15,80	2,08	1037,3	796,67	
	2-3	16,01	2,05	1097,9	856,69	
	2-4	16,05	2,08	1331,1	1006,39	
	2-5	15,75	2,11	1255,5	940,01	
3 T= 480°C P=385N $\alpha = 25^\circ$	3-1	15,49	1,60	713,9	945,16	864,93
	3-2	16,40	1,49	655,5	945,18	
	3-3	15,49	1,60	631,2	835,67	
	3-4	15,10	1,53	574,3	858,67	
	3-5	15,60	1,66	605,9	739,98	
4 T= 420°C P=530N $\alpha = 22^\circ$	4-1	15,15	1,87	893,9	885,83	807,27
	4-2	15,50	1,79	739,1	781,31	
	4-3	15,20	1,89	932,8	901,95	
	4-4	15,15	1,70	690,5	827,97	
	4-5	14,89	1,70	524,0	639,29	

AFP процесот успешно може да се користи за полагање тенки препрег ленти врз површини кои можат да бидат заоблени односно за добивање на несиметрични ламинати [2, 44]. При примена на овој процес за полагање на препрег ленти на такви несиметрични површини се овозможува локално менување на физичката ориентација на лентите кое што условува преклопување на празнини и намалување на дефекти внатре во структурата. Затоа, овој процес најмногу се применува за добивање на помали и закривени делови, а кога се полага на рамни површини точноста на роботот станува клучно прашање при примената во полагање на препрег лентите. Вакви сознанија се потврдени и во истражувањата на S. Samak et al. [121] кои укажуваат дека за избегнување на неправилностите и грешките во ламинатите важно е да се контролира точноста на роботот и параметрите на процесот. Тие во своите истражувања ги анализирале дефектите во структурата добиени за време на автоматизираното полагање

на препрег ленти врз основа на РЕЕК и јаглородни влакна со AFP постапка на заоблена површина. Овој труд го објаснува влијанието на точноста на роботот во однос на генерираните дефекти пори и преклопувања при полагање на влакната. Микроструктурите била анализирана со примена на оптички микроскоп. Анализираниите резултати покажале дека присуството на пори, јазови и/или преклопување не се повеќе од 3%. Во нашите истражувања содржината на пори е три пати повеќе што јасно покажува дека точноста на роботот има важна улога од една страна и од друга страна дека AFP процесот е технологија која се применува за полагање на препрег ленти врз површини кои можат да бидат заоблени и кои што можат да ротираат, како и за добивање на помали композитни делови.



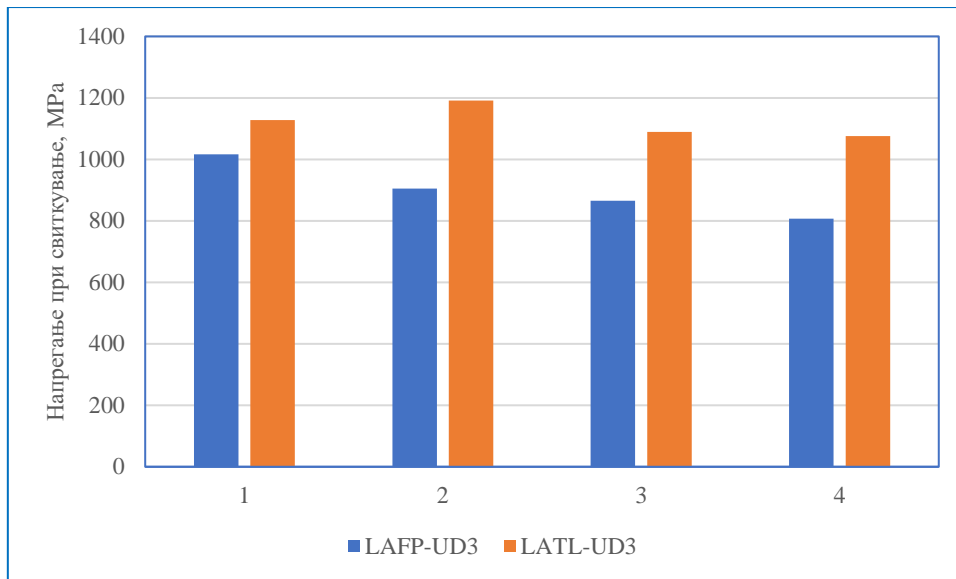




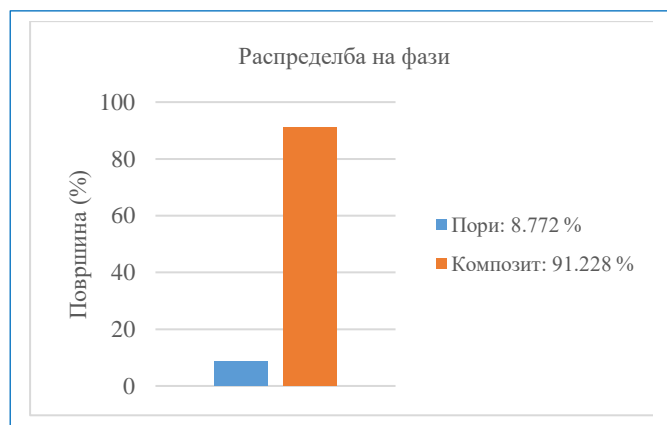
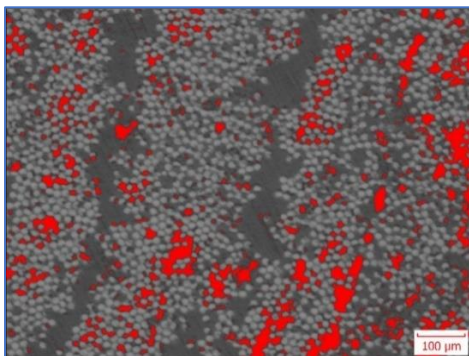
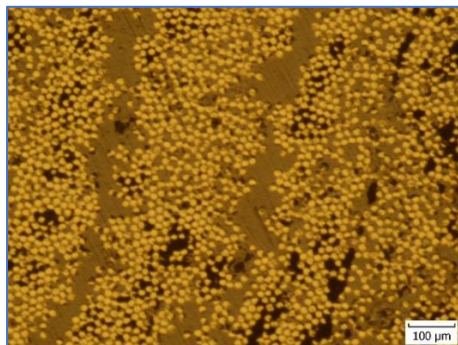
Слика 7.26. Добиени криви сила – време ($N, sek.$) од тестирање на ламинатни плочи LAFP UD3

Табела 7.16. Добиени средни вредности за напрегања при свиткување за примероци со ознака LAFP-UD3 и LATL-UD3

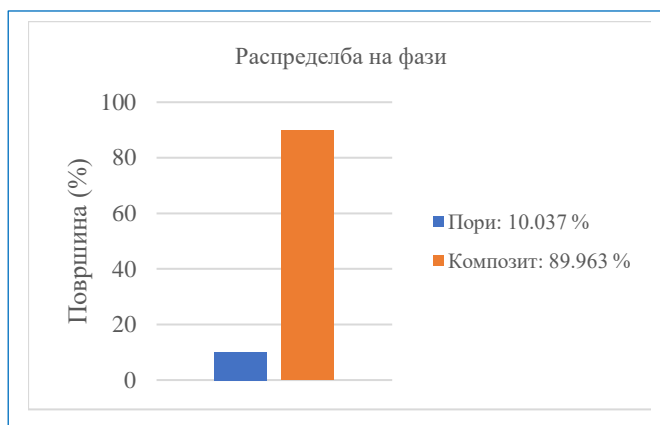
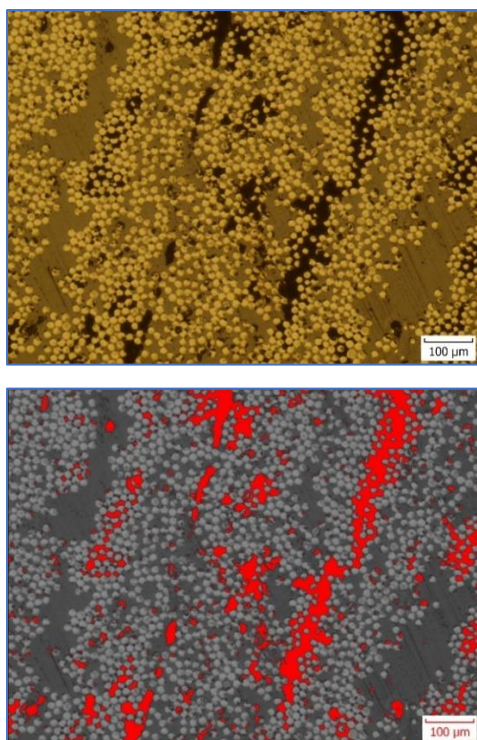
Напрегање при свиткување $\sigma_{sr.}$ (MPa)	LAFP-UD3		LATL-UD3	
	1 T= 480°C P=530N $\alpha = 25^\circ$	1016,53	Серија 1	1127,96
	2 T= 480°C P=530N $\alpha = 22^\circ$	905,45	Серија 3	1191,52
	3 T= 480°C P=385N $\alpha = 25^\circ$	864,93	Серија 5	1089,30
	4 T= 420°C P=530N $\alpha = 22^\circ$	807,27	Серија 4	1075,49



Слика 7.27. Споредба на добиените средни вредности за напрегање при свиткување за примероци со ознака LAFP-UD3 и LATL-UD3

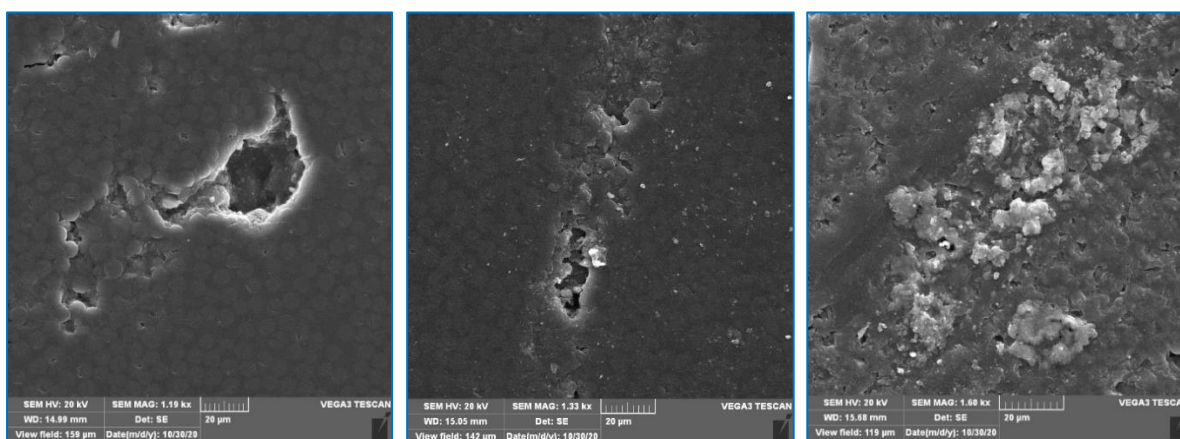


a) LAFP UD 3 примерок 2

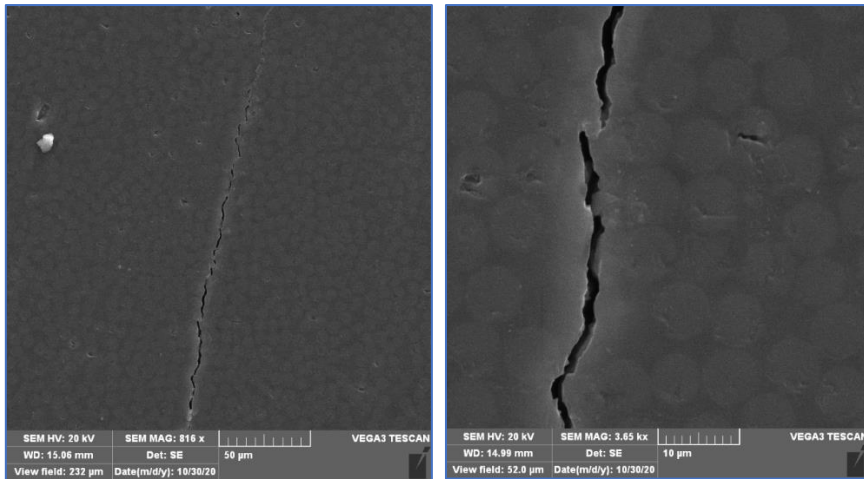


б) LAFP UD 3 примерок 4

Слика 7.28. Металографски снимки на попречен пресек на примероци ламинатни плочи со ознака LAFP-UD3 а) примерок 2; б) примерок 4



а) LAFP UD 3 примерок 2



b) LAFP UD 3 примерок 4

Слика 7.29. СЕМ снимки на попречен пресек на примероци ламинатни плочи со ознака LAFP-UD3 а) примерок 2; б) примерок 4

7.4. Добиени резултати за напрегање при свиткување на примероци ламинатни плочи добиени со рачно полагање на препрег ленти UD1, UD2 и UD3 и со конвенционално компресионо пресување

Во рамките на истражувањата на оваа докторска дисертација произведени се примероци ламинатни плочи со рачно полагање од трите типови препрег ленти со ознаки UD1, UD2 и UD3 и со компресионо пресување во преса. Овие ламинатни плочи се произведени за да се споредат со исти примероци добиени со автоматизирана постапка. За таа цел подготвени се пакети од осум слоеви препрег ленти, а секој слој е составен од шест ленти со ширина од 25 mm, како што се полагани и со автоматизираните постапки. Условите на процесирање односно за компресионо пресување на подготвените пакети се избрани врз основа на добиените сознанија од претходно направените истражувања при автоматизираните постапки за полагање на препрег лентите. При конвенционалното компресионо пресување не може да се земат потполно истите услови, затоа што тука подготвениот пакет од слоеви се става во калап и се процесира на температура и притисок, а потоа се лади. Во оваа постапка нема полагање и загревање на слој по слој и негово поврзување со ламинатот. Од тука произлегува и заклучокот дека постапката на добивање на примероците ламинатни плочи со конвенционално компресионо пресување е различна. За да дојде до добро поврзување на слоевите применета е пониска

температура, а поголемо време на пресување и повисок притисок. Повисоката температура може да доведе до течење на термопластот, а со тоа нема да се постигне спојување на слоевите. Затоа, температурата која е применета е блиску до температурата на стаклосување (T_g) на термопластичните матрици. Направени се три типови ламинатни плочи од трите типови на унидирекционален препрег. Условите на процесирање и ознаките на примероците дадени се во табела 6.6. во експерименталниот дел. Потоа, од добиените типови на ламинатни плочи извадени се примероци и истите се тестирани на универзална машина за тестирање на напрегање при свиткување. Димензиите на примероците како и добиените максимални сили на притискање на епруветите пред нивно кршење и пресметаните напрегања при свиткување, дадени се во табела 7.17, додека, добиените дијаграми сила – време ($N\text{-sek}$) добиени од универзалната машина за тестирање дадени се на слика 7.30.

Добиените резултати покажаа многу пониски вредности за напрегање при свиткување за ламинатните плочи произведени со компресионо пресување. Причината за тоа може да биде големото време на процесирање што резултира во топење на термопластичната матрица и нејзино декомпакусирање, а притисокот не е доволен да направи компакција на заробениот воздух. Тоа јасно се гледа и од добиените снимки на попречните пресеци на примероците со оптички микроскоп со зголемување 200, прикажани на слика 7.31 а), б), в). Доколку се примени поголем притисок тогаш може да настане истиснување на полимерната матрица, а тоа ќе резултира во слаба врска меѓу слоевите. Добиените криви имаат ист облик како сите добиени криви при тестирање на напрегање при свиткување. Кривата расте со зголемување на притисокот, а кога ќе се постигне максималната сила пред кршење на епруветите, се појавува пик, после што примерокот се крши.

Добиените снимки од оптички микроскоп дадени на слика 7. а) CM-UD1, б) CM-UD2 и в) CM-UD3 јасно покажуваат дека во микроструктурата на добиените примероци има многу дефекти односно пори што значи дека нема остварено интимен контакт по целата површина и нема добра врска меѓу слоевите. Особено лоша е врската меѓу слоевите кај примерокот со ознака CM-UD1 што се одразува и на добивање на помала вредност за напрегање при свиткување (617,74MPa) во споредба со другите два примероци. Примероците со ознака CM-UD2 и CM-UD3 кои се врз основа на исти препрег но од различен производител, имаат повисоки вредности за напрегање при свиткување за околу 20% во однос на примерокот CM-UD1. Тие се добиени на повисока температура

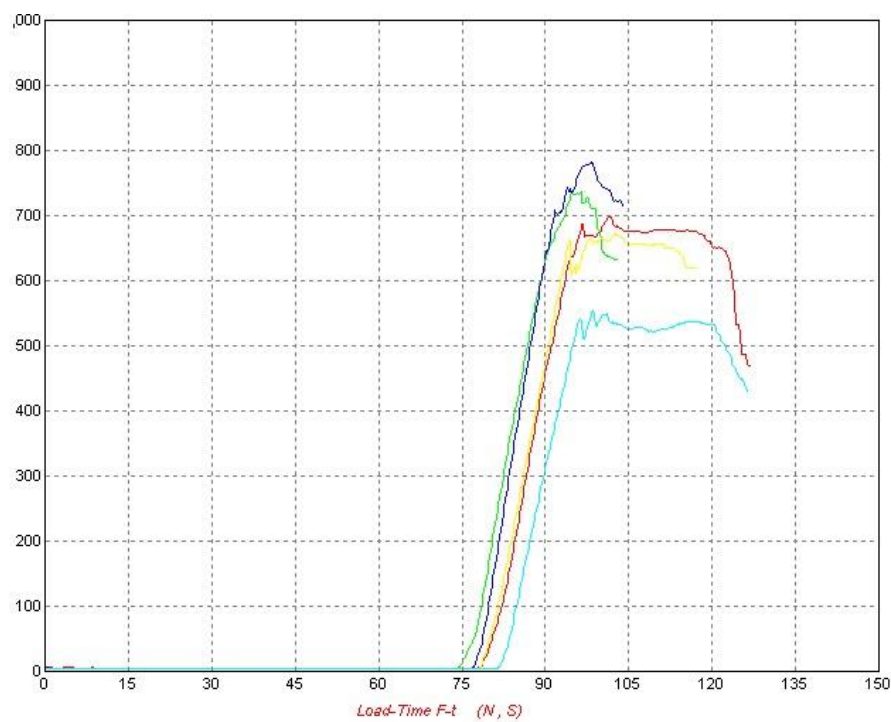
која е одредена врз основа на термопластичната матрица РЕЕК и со поголем притисок. Од добиените оптички снимки, слика 7.31 б) и в), повторно се забележани многу пори меѓу слоевите, но со помала димензија во споредба со тие кај примерокот CM-UD1. Кај овие примероци исто така не е постигната добра врска меѓу слоевите. Добиените пори кај сите три примерока се надвор од дозволените граници на толеранција и затоа не се направени подетални СЕМ анализи на истите.

Рачното полагање на термопластични ленти и компресионо пресување на истите е процес кој не е споредлив со автоматизираната постапка. Добиените плочи од термопластични ленти се со многу послаб квалитет, а точноста на поставување на лентите зависи исклучиво од операторот. Истражувањата кои се направени во рамките на докторската дисертација за рачното полагање на термопластични ленти и нивно компресионо пресување во преса се со цел да го покажат тоа. Исто така, оваа постапка за добивање на производи од композитни термопластични материјали покажува колкава е предноста од автоматизација на процесите во однос на точност, продуктивност и добивање на производи со врвни карактеристики.

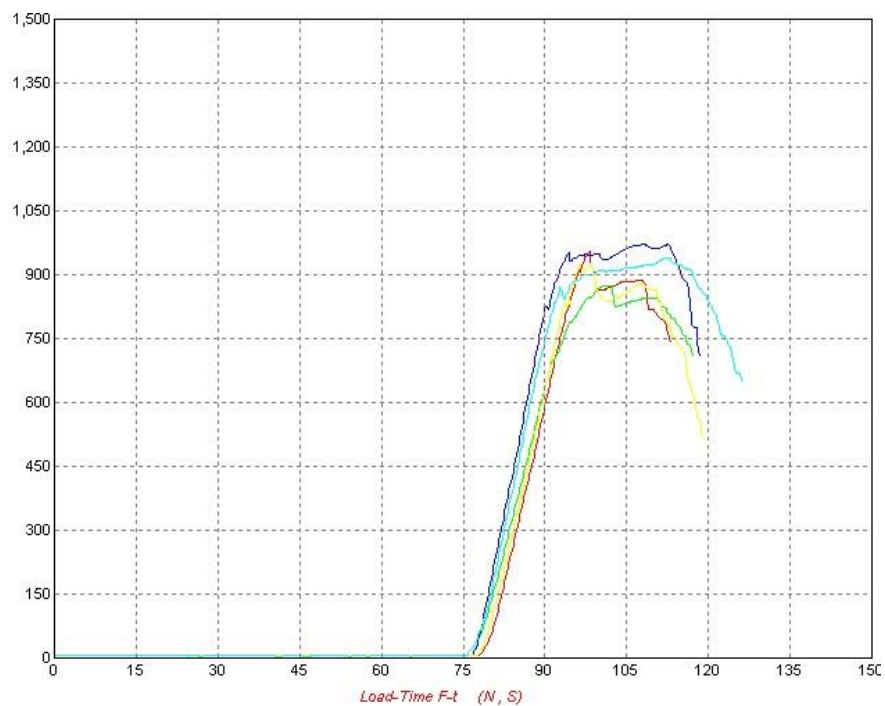
Компресионото пресување на еднонасочни ленти би било ефикасно кога во автоматизираните постапки би се применило како дополнително процесирање. Вакви истражувања не се направени, затоа што, со истражувањата во оваа докторска дисертација главната поставена цел е да се добијаат производи од композитни материјали на самото место без примена на дополнителни процеси.

Табела 7.17. Резултати добиени за напрегање при свиткување за примероци CM-UD1, CM-UD2 и CM-UD3

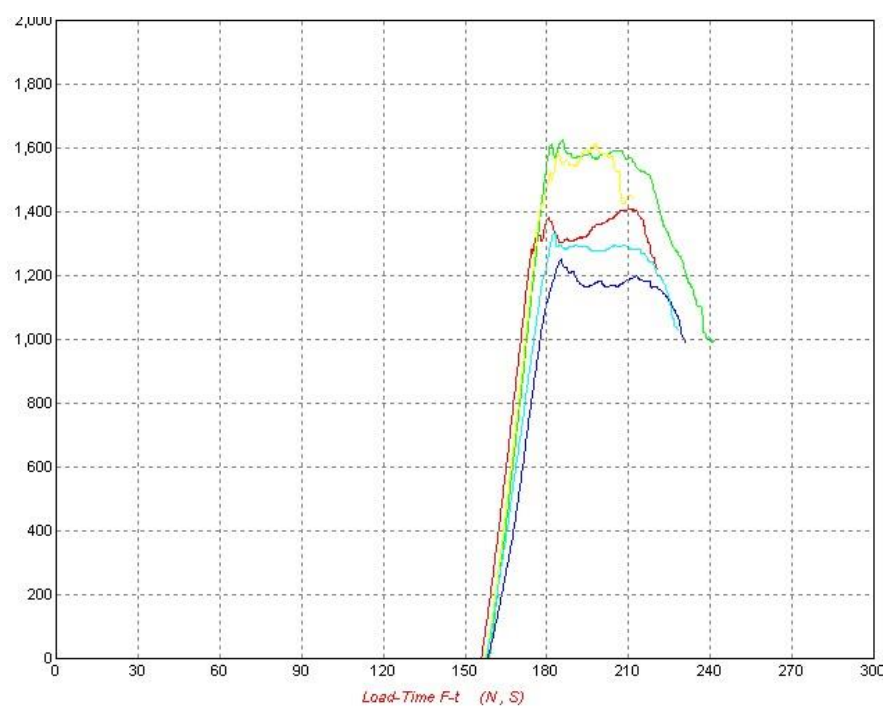
Ознака на примероците		Ширина b (mm)	Дебелина d (mm)	F (N)	σ (MPa)	σ_{sr} (MPa)
CM-UD1	1-1	15,31	1,95	697,01	628,56	617,74
	1-2	15,20	2,16	736,21	544,86	
	1-3	15,30	2,05	781,11	637,69	
	1-4	15,28	1,86	671,00	666,40	
	1-5	15,19	1,77	554,13	611,17	
CM-UD2	2-1	15,13	1,87	954,10	946,64	884,11
	2-2	15,07	1,96	875,01	793,49	
	2-3	15,17	1,96	971,11	874,74	
	2-4	15,03	1,84	927,00	956,41	
	2-5	15,11	1,96	939,15	849,27	
CM-UD3	3-1	15,17	1,96	1410,04	730,47	746,71
	3-2	15,10	1,84	1624,00	821,19	
	3-3	15,19	1,86	1251,27	607,75	
	3-4	15,14	1,77	1611,11	846,06	
	3-5	15,16	1,96	1332,12	728,11	



a) CM-UD1

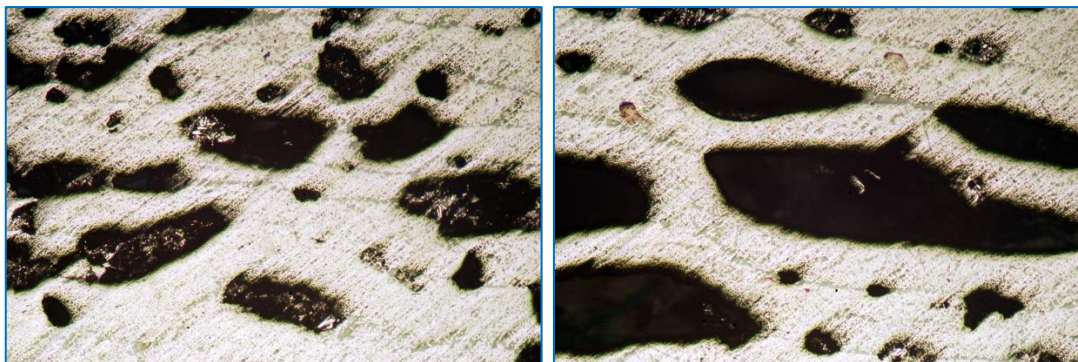


б) CM-UD2

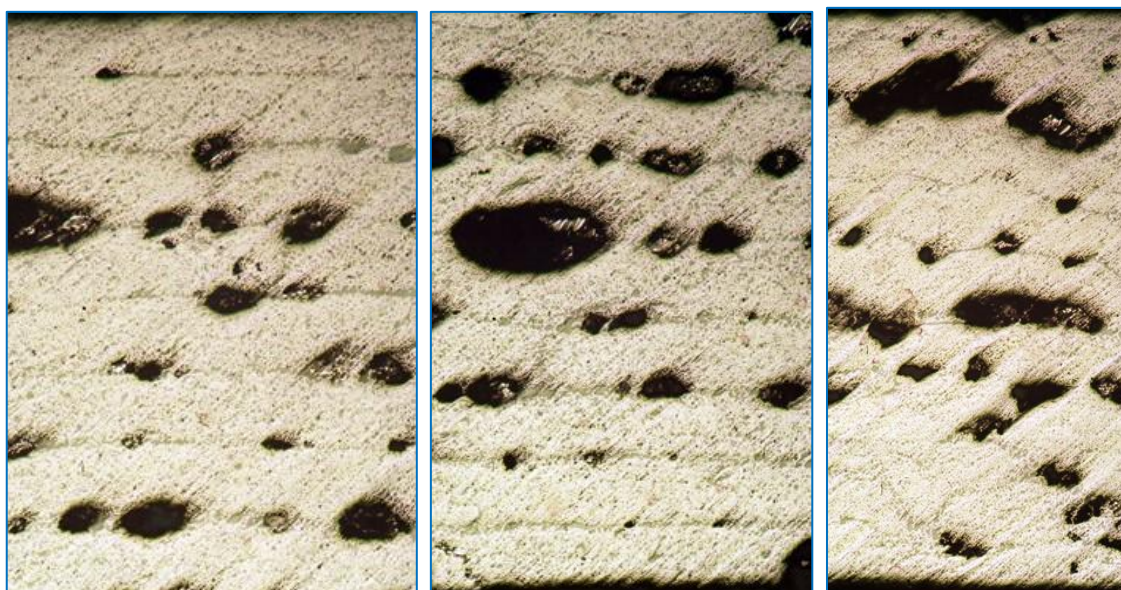


в) CM-UD3

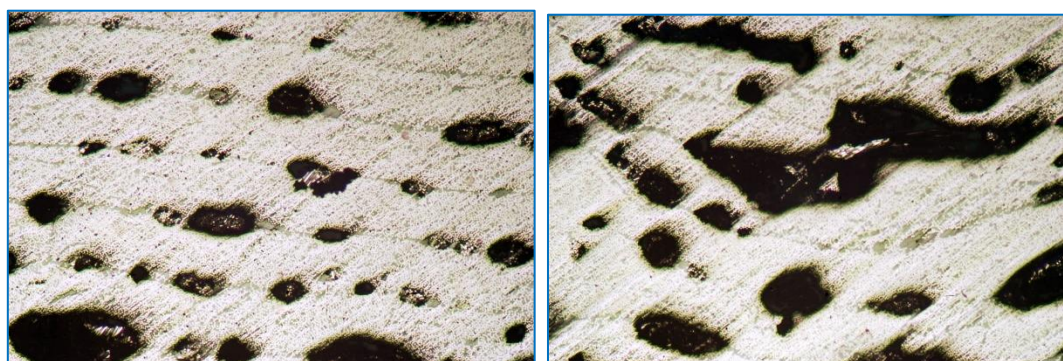
Слика 7.30. Добиени криви сила – време ($N, sek.$) од тестирање на ламинатни плочи а) CM-UD1; б) CM-UD2; в) CM-UD3



a) CM-UD1



б) CM-UD2



в) CM-UD3

Слика 7.31. Металографски снимки од оптички микроскоп на попречен пресек на ламинатни полчи а) CM-UD1, б) CM-UD2, в) CM-UD3

8. ЗАКЛУЧОК

Истражувањата во докторската дисертација се насочени кон анализа на влијанието на температурата на процесирање, притисокот на валјачето и распределбата на ласерските зраци преку аголот на поставување на ласерскиот уред врз карактеристиките на добиената композитна структура.

Врз основа на направените истражувања во оваа докторска дисертација може да се залучи следното:

- Произведените ламинатни плочи, поодделно од трите типови на термопластичен препрег според планот на експерименти односно 2^3 факторниот експериментален дизајн, тестирани се на напрегање при свиткување, а врз основа на добиените резултати за сите осум комбинации на факторите, добиени се регресиони равенки кои најмногу ги опишуваат процесите. Имено, за сите три типови ламинатни плочи, добиено е дека температурата на процесирање како процесен параметар X_1 и притисокот на валјачето како процесен параметар X_3 значајно влијаат при процесирањето. Најмало е влијанието на аголот на поставување на ласерот. Постои интеракција меѓу сите фактори која исто така влијае врз процесот но со помала значајност.

- За трите типови ламинатни плочи направена е проверка на добиени регресиони равенки според Фишеровиот критериум, односно определена е адекватноста на равенките. Врз основа на направените пресметки заклучено е дека регресионите равенки се адекватни и сосема добро ги опишуваат процесите.

- Примероците добиени со осум различни услови на полагање со ATL постапка и со промена на три фактори при процесирање на две нивоа покажаа различни напрегања при свиткување.

- За сите тестирани примероци добиена е релативно добра јакост на врска што резултира во добри вредности за напрегања при свиткување со најголемо отстапување од околу 20% од највисоката вредност. Напрегањето при свиткување за сите испитувани примероци зависи главно од промената на притисокот и температурата во точката на спојување, а аголот на поставеност на ласерот само ја распределува ласерската светлина меѓу лентата и ламинатот.

- Највисоки вредности за напрегање при свиткување имаат примероците што се добиени на најголемите истражувани температури на процесирање и притисок на валјаче. Добро напрегање при свиткување покажаа и примероците кои се добиени со примена на повисок притисок на валјаче, а пониска температура на процесирање и агол на поставеност на ласер од 22° и 25°.

- Највисоки вредности за напрегање при свиткување се добиени на највисоките истражувани температури на процесирање и притисоци на валјачето при агол на поставеност на ласерот од 25°. Задоволително напрегање при свиткување покажаа и примероците кои се добиени со примена на повисок притисок на валјаче, а пониска температура на процесирање и агол на поставеност на ласер од 22° и 25°.

- Примероците добиени кога притисокот на валјаче и температурата на процесирање се на најниски истражувани вредности, а при поголем аголот на поставеност на ласер од 25° покажаа најмало напрегање при свиткување.

- Од направените микроскопски анализи на снимките добиени со оптички микроскоп и скенирачки електронски микроскоп на попречните пресеци на примероци со најдобри и најслаби вредности за напрегање при свиткување, добиено е дека има добра интерламинарна поврзаност кај ламинатните плочи каде процесната температурата и притисокот на валјачето се на највисоки истражувани вредности. Од добиените снимки од оптички микроскоп со зголемување од 200 пати, јасно се гледаат слоевите и поврзаноста меѓу нив со слаби трагови на празнини на некои места. Содржината на пори во анализираните примероци е многу мала до 2%, што покажува дека примената на повисок притисок на валјаче и повисока температура на процесирање резултира во постигнување на добар интимен контакт меѓу површините, добра интердифузија на полимерните молекули и добра автохезија односно самоповрзување. На тој начин, постигната е добра јакост на врска меѓу слоевите што се потврдува и со добиените високи вредности за напрегање при свиткување на овие примероци. СЕМ снимките направени со зголемувања од 700 пати го потврдуваат доброто поврзување на слоевите меѓу себе, при што не се забележува граница меѓу поврзаните слоеви и не се разликуваат полимерните вериги од двете површини.

Примероците кои имаат пониски вредности на напрегање при свиткување појавуваат поголем број на пори особено во пределите на интерламинарно поврзување. Тоа се примероци добиени на најниските истражувани вредности на притисок на валјаче и

температура на процесирање, а појавата на поголем процент на пори (4,8%) се должи на недоволно големиот применет притисок на валјаче.

- Примероците кои се врз основа на исти конституенти само од различни производители (со ознака LATL-UD2 и LATL-UD3) покажаа исто однесување при исти услови на процесирање.

- Како најдобри услови за полагање на термоластични унидирекционални препрег ленти се определени:

- температура на процесирање 380°C, притисок на валјаче 380N и агол на поставеност на ласер 25° за ламинатните примероци со ознака LATL-UD1.
- температура на процесирање 480°C, притисок на валјаче 530N и агол на поставеност на ласер 25° за ламинатните примероци со ознака LATL-UD2 и LATL-UD3.

- Во рамки на истражувањата произведени се примероци ламинатни плочи и со AFP постапката, кои покажаа послаби карактеристики односно пониски вредности за напрегање при свиткување за околу 25% во споредба со примероците ламинатни плочи добиени на исти услови со ATL постапка. Преку добиените оптички и СЕМ снимки забележани се неправилности како што се празнини и пори и определен е поголем процент на пори од 8% до 10%. На СЕМ снимките забележани се пори со поголеми димензии, а на одредени делови и промена на структурата на термопластичната матрица заради повисоката температура на процесирање или аголот под кој паѓаат ласерските зраци. Заклучено е дека при полагањето со AFP постапка се полагаат поголем број на тесни летни заради што се се појавуваат голем број на споеви во лентите и во слоевите, а со тоа и повеќе неправилности.

- Во рамките на истражувањата на оваа докторска дисертација произведени се и примероци ламинатни плочи со рачно полагање од трите типови препрег ленти и со компресионо пресување во преса, со условите на процесирање избрани врз основа на добиените сознанија од претходно направените истражувања при автоматизираните постапки за полагање на препрег лентите. Добиените резултати од испитувањето на тие примероци покажаа многу пониски вредности за напрегање при свиткување. Причината за тоа е големото време на процесирање што резултира во топење на термопластичната матрица и нејзино декомпакусирање и ограничената примена на притисокот кој не е доволен да направи компакција на заробениот воздух. Добиените снимки од оптички микроскоп јасно покажуваат дека во микроструктурата на добиените примероци има

многу дефекти односно пори што значи дека нема остварено добра врска меѓу слоевите. Главниот недостаток на овој произведен процес со рачно полагање и компресионо пресување е тоа што квалитетот на композитната структура зависи од искуството на работникот, а тоа значи дека точноста на полагање на слоевите не е постојана. Дополнително, самиот процес е многу бавен бидејќи е потребно време за загревање и ладење на пакетот слоеви кои се пресуваат. И на крај, добиените производи врз основа на термопластичен препрег ленти немаат добар квалитет односно се неспоредливи со квалитетот на истите добиени со автоматизирана постапка.

- Автоматизацијата на процесите ги намалува трошоците за работна сила, како и трошоците поврзани со отпад и губитоци поради човечки грешки, има голем потенцијал за флексибилно производство на лесни структури со врвни карактеристики, односно има висока продуктивност. Автоматското полагање на ленти претставува една од поновите производни технологии кои сеуште се истражуваат и унапредуваат, а се перспективна технологија за авионската и други индустрии.

- Истражувањата направени во докторската дисертација даваат добра насока за добивање на производи од термопластични композитни материјали на само место со примена на роботизираните постапки и загревање со ласер. Ласерското загревање овозможува висока продуктивност, но и покрај тоа, производниот процес со автоматското полагање на ленти и загревање со помош на ласер е во фаза на развој за добивање на структури со врвни карактеристики.

Идни насоки на истражување

Во идните истражувања, фокусот би бил ставен главно врз подобрување на процесот за добивање на делови од композитни материјали на самото место со механички карактеристики аналогни на композитни делови произведени со автоклав, со цел да се зголеми продуктивноста на процесот, да се отфрли автоклавската технологија и да се добие поефтин композитен производ.

За реализација на тоа, идните истражувања главно би се одвивале во неколку насоки:

- Анализа на други техниолошки параметри: како загревање на мандрелот (алатот), брзината на полагање, избор на леќа од оптиката за правилна

- дистрибуција на зракот од ласерот, и др. кои би влијаеле на автоматизираните процеси за добивање на структури со уште подобри карактеристики.
- Развој на програма за детектирање on-line грешки и нивно отстранување кои се јавуваат во текот на полагање кои исто би влијаеле на карактеристиките на крајниот продукт.
 - Математички модели за термичка дифузија на термопластичната матрица во точката на поврзување (*nir* точка) меѓу слоевите, а притоа добивање на делови од композитни материјали со супериорни карактеристики
 - Истражувања врз крајниот производ од AFP/ATL процес и корелацијата помеѓу точноста на роботот, технолошките параметри и квалитетот на интерланминарното поврзување во крајниот производ.

9. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

1. S. V. Hoa, Automated composites manufacturing, *Sci Eng Compos Mater* 22(2): p. 113, (2015), DOI 10.1515/secm-2015-0060.
2. D. H. – J. A. Lukaszewicz, C. Ward, K. D. Potter, The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future, *Composites Part B: Engineering*, 43, no. 3, pp. 997-1009 (2012), DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.12.003.
3. R. Schledjewski, Thermoplastic tape placement process – in situ consolidation is reachable, *Plastics, Rubber and Composites*, 38, 379–386 (2009), DOI: <https://doi.org/10.1179/146580109X12540995045804>.
4. T. Orth, C. Weimer, M. Krahl, N. Modler, A review of radiative heating in automated layup and its modelling, *Journal of Plastic Technology*, 13, (2017).
5. E. Beyeler, W. Philips, S. I. Guceri, Experimental Investigation of Laser-Assisted Thermoplastic Tape Consolidation, *Journal of thermoplastic composite materials*, 1, 107–121 (1988), DOI: 10.1177/089270578800100109.
6. A. J. Corner, D. Ray, W. O. Obande, D. Jones, J. Lyons, I. Rosca, R.M. O’ Higgins, M.A. McCarthy, Mechanical characterisation of carbon fibre–PEEK manufactured by laser-assisted automated-tape-placement and autoclave, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 69, 10–20 (2015), DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.10.003.
7. D. Abliz, Y. Duan, L. Steuernagel, L. Xie, D. Li, G. Ziegmann, Curing Methods for Advanced Polymer Composites - A Review. *Polymers and Polymer Composites*, 21:6, 341-348 (2013). <https://doi.org/10.1177/096739111302100602>
8. W. J. B. Groupe, G. Vanden Poel, L. L. Warnet, R. Akkerman, On crystallisation and fracture toughness of poly (phenylene sulphide) under tape placement conditions. *Plastics, Rubber and Composites*, 42:7, 282-288 (2013). <https://doi.org/10.1179/1743289812Y.0000000039>
9. Graeme D. Ruxton and Nick Colegrave, *Experimental Design for the Life Science*, Oxford University Press, 2013. ISBN: 9780198717355.
10. J. Goupy, L. Creighton, *Introduction to Design of Experiments*, SAS Press; 3 edition (October, 2007). ISBN-10: 1599944227, ISBN-13: 978-1599944227.

11. A. Dean, D. Voss, D. Draguljic, Design and Analysis of Experiments, Springer International Publishing, 2017. DOI 10.1007/978-3-319-52250-0; eBook ISBN 978-3-319-52250-0;
12. Deborah D.L. Chung, Composite Materials Science and Applications. Springer, London 2010. DOI <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-831-5>, Print ISBN 978-1-84882-830-8, Online ISBN 978-1-84882-831-5.
13. S. T. Peters, Handbook of Composites, Springer, Boston, MA, 1998. DOI <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6389-1>, Print ISBN 978-0-412-54020-2 , Online ISBN 978-1-4615-6389-1.
14. D. B. Miracle and S. L. Donaldson, ASM Handbook Volume 21: Composites, ASM International, 2001, ISBN: 978-0-87170-703-1.
15. Sanjay K. Mazumdar, Composites Manufacturing - Materials, Products and Process Engineering, CRC Press, December, 2001. ISBN 9780849305856.
16. Daniel Gay, Suong V. Hoa, Stephen W. Tsai, Composite Materials: Design and Applications, CRC Press, 2002. ISBN 1420031686, 9781420031683.
17. Suong V. Hoa, Principles of the Manufacturing of Composite Materials, DEStech Publications, Inc., 2009. ISBN: 978-1-932078-26-8.
18. Ever J. Barbero, Introduction to composite material design, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, Second edition (2011), ISBN 10: 1439894132, ISBN 13: 9781439894132.
19. William D. Callister , David G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th Edition, John Wiley & Sons Inc. (2018). ISBN: 978-1-119-40549-8.
20. Krishan K. Chawla, Composite Materials: Science and Engineering, Springer-Verlag New York, Second edition (December, 2010). ISBN-10: 1441931244, ISBN-13: 978-1441931245.
21. **Nielsen**, Lauge Fuglsang, Composite Materials: Properties as Influenced by Phase Geometry, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. DOI 10.1007/978-3-540-27680-7, eBook ISBN 978-3-540-27680-7.
22. Domenico Brigante, New Composite Materials: Selection, Design, and Application, Springer International Publishing, 2014. DOI 10.1007/978-3-319-01637-5, eBook ISBN 978-3-319-01637-5.
23. Kamal K. Kar, Composite Materials: Processing, Applications, Characterizations, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017. DOI 10.1007/978-3-662-49514-8, eBook ISBN 978-3-662-49514-8.

24. Xiao-Su Yi, Shanyi Du, Litong Zhang, Composite Materials Engineering, Volume 1: Fundamentals of Composite Materials, Springer Singapore, 2018. DOI 10.1007/978-981-10-5696-3, eBook ISBN 978-981-10-5696-3.
25. Deborah D.L. Chung, Composite Materials: Functional Materials for Modern Technologies, Springer-Verlag London, 2003. DOI 10.1007/978-1-4471-3732-0, eBook ISBN 978-1-4471-3732-0.
26. Robert J. Young, Peter A. Lovell, Introduction to Polymers, Second Edition, Taylor & Francis, 1991. ISBN 0748757406, 9780748757404.
27. J.M.G. Cowie, Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials, 2nd Edition, CRC Press, 1991, ISBN 0748740732, 9780748740734.
28. Robert O. Ebewele, Polymer Science and Technology, CRC Press, 2000, ISBN 1420057804, 9781420057805.
29. Arthur W. Birley, Plastics Materials: Properties and Applications, Springer Science & Business Media, 2012, ISBN 1461536642, 9781461536642.
30. Qipeng Guo, Thermosets: Structure, Properties and Applications, Elsevier Science, 2012, ISBN 0857097636, 9780857097637.
31. Throne J.L. (1998) Processing Thermoplastic Composites. In: Peters S.T. (eds) Handbook of Composites. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6389-1_25. Online ISBN 978-1-4615-6389-1.
32. Mikell P. Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems 4th Edition, Wiley; January, 2010, ISBN-10: 0470467002, ISBN-13: 978-0470467008.
33. William D. Callister, Materials Science and Engineering: An Introduction 7th Edition, Wiley, (February, 2006), ISBN-10: 0471736961, ISBN-13: 978-0471736967.
34. Thomas Weiler, Thermal Skin Effect in Laser-Assisted Tape Placement of Thermoplastic Composites, Thesis, January 2020 DOI: 10.18154/RWTH-2019-06638
35. A.J.Comer, D.Ray, W.O.Obande, D.Jones, J.Lyons, I.Rosca, R.M.O' Higgins, M.A.McCarthy, Mechanical characterisation of carbon fibre-PEEK manufactured by laser-assisted automated-tape-placement and autoclave, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 69, 2015, pp. 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.10.003>
36. <https://www.compositesworld.com/articles/peek-vs-pekk-vs-paek-and-continuous-compression-molding>

37. Douglas C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments* 9th edition, John Wiley & Sons, (April 2, 2019). ISBN-10: 1119589061, ISBN-13: 978-1119589068.
38. В.Риков, В. Иткин, *Математическаја статистика и планирование експеримената*, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, 2008.
39. И. Агајинц, А. Орлов, *Планирование експеримента и анализ данних*, МИТХТ, Ломоносов, Москва, 1998.
40. F C Campbell, *Manufacturing processes for advanced composites*, Oxford : Elsevier, 2004. ISBN 9781856174152.
41. C. Grant, Automated processes for composite aircraft structure. *Ind Robot* 33, 2006, pp. 117–121.
42. K. Yassin, H. Hojjati, Processing of thermoplastic matrix composites through automated fiber placement and tape laying methods: a review, *J Thermoplast Compos Mater* 31, 2018, pp. 1676–1725.
43. P.D. Mangalgi, Composite materials for aerospace application, *Bull Mater Sci* 22, 1999, pp. 657–664.
44. B. Shirinzadeh, C. W. Foong, B. H. Tan, Robotic fibre placement process planning and control, *Assembly Autom* 20, 2000, pp.313–320.
45. C. Soutis, Fibre reinforced composites in aircraft construction, *Prog Aerosp Sci* 41, 2005, pp. 143–151.
46. J. Frketic, T. Dickens, S. Ramakrishnan, Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites: an additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing, *Addit Manuf* 14, 20 17, pp.69–86.
47. A. Crosky, C. Grant, D. Kelly, X. Legrand, G. Pearce, G. “Fibre placement processes for composite manufacture”, *Advances in Composites Manufacturing and Process Design*, Elsevier Ltd, 79 -92, 2015.
48. <https://mikrosam.com/new/article/en/automated-fiber-placement-the-complete-system/>
49. M. A. Khan, P. Mitschang, R. Schledjewski, Identification of some optimal parameters to achieve higher laminate quality through tape placement process, *Advances in Polymer Technology*, 29 (2), 98–111 (2010). DOI: 10.1002/adv.20177
50. C. Kassapoglou, *Design and analysis of composite structures: with applications to aerospace structures*, 2nd edition, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2013.

51. B T Åström, Manufacturing of polymer composites 1st edition, London : Chapman & Hall, 1997. ISBN 0412819600 9780412819605 9780748770762 0748770763.

52. Mehran Eimanlou, Investigation of the effect of process parameters on bond strength of thermoplastic composite rings manufactured using fiber laser, A Thesis in the Department of Mechanical, Industrial, and Aerospace Engineering, Concordia University Montréal, Québec, Canada, 2018.

53. Grouve W.J., Warnet L.L., Rietman B., Visser H.A., Akkerman R., "Optimization of the tape placement process parameter for carbon-PPS composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 50, no. 1, pp. 44-53, 2013.

54. M. A. Khan, P. Mitschang, R. Schledjewski, "Parametric Study on Processing Parameters and Resulting Part Quality Through Thermoplastic Tape Placement Process," *Journal of Composite Materials*, vol. 47, no. 4, pp. 485-499, 2012.

55 C. M. Stokes-Griffin, P. Compston, The effect of processing temperature and placement rate on the short beam strength of carbon-fibre-PEEK manufactured using a laser tape placement process, *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing*. 78:247-283., 2015.

56. C. M. Stokes-Griffin and P. Compston, "Laser-Assisted Tape Placement of Termoplastic Composites: The Effect of Proces Parameters on Bond Strength," in *Sustainable Automotive Technologies 2013 Proceedings of the 5th International Conference ICSAT 2013*, Ingolstadt, 2013.

57. E. Beyeler, W. Phillips, S.I. Güçeri, "Effects of processing on laser assisted thermoplastic tape consolidation," *Composites Part A*, vol. 26, no. 9, pp. 669-673, 1997.

58. Comer A.N., Hammond P.E., Ray D.I., Lyons J.O., Obande W.I., Jones D.A., O'Higgins R.O., McCarthy M.I., "Wedge peel interlaminar toughness of carbon-fibre/PEEK thermoplastic laminates manufactured by laser-assisted automated-tape-placement (LATP)," in *CETEC14*, Finland, 2014.

59. Agrawal V., Mccullough R.L., Schultz J.M., "The thermoplastic laser-assited consolidation process - mechancial and microstructure characterization," *Thermoplastic Composite Materials*, vol. 9, no. 4, pp. 365-380, 1996.

60. Chang I.Y., Lees J.K., "Recent development in thermoplastic composites: A review of matrix systems and processing methods," *Thermoplastic Composite Materials*, vol. 1, no. 3, pp. 277-296, 1998.

61. Pistor C.M., Yardimci M.A., Güçeri S.I., "On-line consolidated thermoplastic composites," *Composite Materials*, vol. 33, no. 4, pp. 306-324, 1999.

62. Yousefpour A., Ghasemi Nejhada M.N., "Experimental and computational study of APC-2/AS4 thermoplastic composite C-rings," *Thermoplastic Composite Material*, vol. 14, no. 2, pp. 129-145, 2001.
63. Yassin K., Hojjati M., "Processing of thermoplastic matrix composites through automated fiber placement and tape laying methods, A review" *Journal of Thermoplastic Composite Materials* vol. 31, no. 12, 2018.
64. W.I. Lee, G.S. Springer, "A model of the manufacturing process of thermoplastic matrix composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 21, pp. 1017-1055, 1987.
65. Yang F., Pitchumani R., "A fractal Cantor set based description of interlaminar contact evolution during thermoplastic composite processing," *Material Science*, vol. 36, pp. 4661-4671, 2001.
66. Mantel S., Springer G., "Manufacturing process models for thermoplastic composites," *Composite Materials*, vol. 26, no. 16, pp. 2348-2377, 1992.
67. Mark B., Gruber J., Tierney J., Brian J., Jensen et al., "Thermoplastic in situ placement requires better impregnated tapes and tows," in SAMPE, Baltimore, 2012.
68. Yang F., Pitchumani R., "Nonisothermal healing and interlaminar bond strength evolution during thermoplastic matrix composites," *Polymer Composites*, vol. 24, no. 2, pp. 263-278, 2003.
69. Bastien L.J., Gillespie J.W., "A non-isothermal healing model for strength and toughness of fusion bonded joints of amorphous thermoplastics," *Polymer Engineering & Science*, vol. 31, no. 24, pp. 1720-1730, 1991.
70. Sonmez F.O., Hahn H.T., "Analysis of the on-line consolidation process in thermoplastic composite tape placement," *Thermoplastic Composite Materials*, vol. 10, no. 6, pp. 543-572, 1997
71. Khan M.A., Mitschang P., Schledjewski R., "Identification of some optimal parameters to achieve higher laminate quality through tape placement process," *Advances in Polymer Technology*, vol. 29, no. 2, pp. 98-111, 2010.
72. Butler C.A., McCullough R.L., Pitchumani R., Gillespie Jr. J.W., "An analysis of mechanisms governing fusion bonding of thermoplastic composites," *Thermoplastic Composite Materials*, vol. 11, no. 4, pp. 338-363, 1998.
73. Ageorges C., Ye L., Mai Y.W., Hou M., "Characteristics of resistance welding of lap shear coupons.: Part II. Consolidation," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 29, no. 8, pp. 911-919, 1998.

74. Stokes Griffin C.M., Compston P., "Investigation of sub-melt temperature bonding of carbonfiber/PEEK in an automated laser tape placement process," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 84, pp. 17-25, 2016.
75. Gao S.L., Kim J.K., "Cooling rate influences in carbon fibre/PEEK composites. Part I: Crystallinity and interface adhesion," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 31, no. 6, pp. 517-530, 2000.
76. Gao S.L., Kim J.K., "Cooling rate influences in carbon fibre/PEEK composites. Part III: impact damage performance," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 32, no. 6, pp. 775-785, 2001.
77. Gao S.L., Kim J.K., "Cooling rate influences in carbon fibre/PEEK composites. Part II: interlaminar fracture toughness," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 32, no. 6, pp. 763774, 2001.
78. Kumar S., Anderson D.P., Adams W.W., "Crystallization and morphology of poly(aryl-ether-etherketone)," *Polymer*, vol. 27, no. 3, pp. 329-336, 1986.
79. Fazil O. Sonmez, H. Thomas Hahn, "Analysis of the On-Line Consolidation Process in Thermoplastic Composite Tape Placement," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 10, 1997.
80. Tierney J., Gillespie Jr. J.W., "Modeling of heat transfer and void dynamics for the thermoplastic composite tow-placement process," *Composite Materials*, vol. 37, no. 19, pp. 1745-1768, 2003.
81. Ranganathan S., Advani S.G., Lamontia M.A., "A non-isothermal process model for consolidation and void reduction during in-situ tow placement of thermoplastic composites," *Composite Materials*, vol. 20, no. 8, pp. 1040-1062, 1995.
82. Brochure for MikroPlace[®] software, Mikrosam.
83. Rosselli F., Santare M.H., Gucerri S.I., "Effects of processing on laser assisted thermoplastic tape consolidation," *Composites PartA: Applied Science and Manufacturing*, vol. 28, no. 12, pp. 10231033, 1997.
84. Mazumdar S.K., Hoa S.V., "Application of taguchi method for process enhancement of on-line consolidation technique," *Composites*, vol. 26, no. 9, pp. 669-673, 1995.
85. S. Grove, "Thermal modelling of tape laying with continuous carbon fibre reinforced thermoplastic," *Composites*, vol. 19 Number 5, 1988.

86. Yousefpour A., Ghasemi Nejhad M.N., "Experimental and computational study of APC-2/AS4 thermoplastic composite C-rings," *Thermoplastic Composite Material*, vol. 14, no. 2, pp. 129-145, 2001.
87. J. Sloan, ATL and AFP: Defining the megatrends in composite aerostructures, *Composites World High-Performance Composites*, 7, (2008).
88. W. J. B. Grouve, L.L. Warnet, B. Rietman, H. A. Visser, R. Akkerman, Optimization of the tape placement process parameters for carbon-PPS composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 50, (2013) pp. 44–53. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.03.003. 15.
89. C. M. Stokes-Griffin, P. Compston, T. I. Matuszyk, M.J. Cardew-Hall, Thermal modelling of the laser-assisted thermoplastic tape placement process, *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 28, pp.1445–1462 (2013), DOI: 10.1177/0892705713513285.
90. P. Hormann, D. Stelzl, R. Lichtinger, S. Van Nieuwenhove, G. M., Carro, K. Drechsler, On the numerical prediction of radiative heat transfer for thermoset automated fiber placement, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 67, pp. 282–288 (2014), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.08.019>.
91. S. M. Grove, Thermal modelling of tape laying with continuous carbon fiber reinforced thermoplastic, *Composites* 19 (5), pp. 367–375 (1988), DOI: 10.1016/00104361(88)90124-3.
92. F. Rosselli, M. H. Santare, S. I. Guceri, Effects of processing on laser assisted thermoplastic tape consolidation, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 28 (12), pp. 1023–1033 (1997), DOI: 10.1016/S1359-835X(97)00072-9.
93. F. O. Sonmez, M. Akbulut, Process optimization of tape placement for thermoplastic composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38 (9), 2013–2023 (2007), DOI: 10.1016/j.compositesa.2007.05.003.
94. M. A. Khan, P. Mitschang, R. Schledjewski, "Parametric Study on Processing Parameters and Resulting Part Quality Through Thermoplastic Tape Placement Process," *Journal of Composite Materials*, vol. 47, no. 4, pp. 485-499, 2012.
95. M. Narnhofer, R. Schledjewski, P. Mitschang, L. Perko, Simulation of the Tape Laying Process for Thermoplastic Matrix Composites, *Advances in Polymer Technology* 32, E705–E713 (2013), DOI: 10.1002/adv.21312.
96. M. A. Khan, P. Mitschang, R. Schledjewski, Parametric study on processing parameters and resulting part quality through thermoplastic tape placement process, *Journal of Composite Materials*, 47, 485–499 (2013), DOI: 10.1177/0021998312441810.

97. BS EN ISO 14125, “Fibre-reinforced plastic composites, Determination of flexural properties” 1998+A1:2011.

98. Standard ASTM D790 “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials”, Annual Book of ASTM Standards Vol 03.01,2000.

99. Product Data HexTow® AS4 Carbon Fiber, Copyright © 2014 – Hexcel Corporation, Stamford, Connecticut. February 2014. <http://www.hexcel.com/contact/salesoffice>

100. Product Designation Sheet, Suprem SA, Switzerland, 2016. www.suprem.ch.

101. Product Data Sheet Tenax®-E TPUD PEEK-HTS45, Teijin Toho Tenax Europe GmbH, Germany, 2015. www.tohotenax-eu.com

102. Minh Hoang Nguyen, Avinkrishnan A. Vijayachandran, Paul Davidson, Damon Call, Dongyeon Lee, Anthony M. Waas, Effect of Automated Fiber Placement (AFP) Manufacturing Signature on Mechanical Performance, AIAA Scitech 2019 -0516, 7-11 January 2019, San Diego, California. <https://doi.org/10.2514/6.2019-0516>

103. Jonathan P.-H. Belnoue, Tassos Mesogitis, Oliver J. Nixon-Pearson, James Kratz, Dmitry S. Ivanov, Ivana K. Partridge, Kevin D. Potter, Stephen R. Hallett, Understanding and predicting defect formation in automated fibre placement pre-preg laminates, *Composites: Part A* 102, (2017), pp. 196–206.

104. Alexander Jordaens, Tim Steensels, Formation of defects in flat laminates during automatic tape laying, *Master of Industrial Sciences 2014- 2015*, KU Leuven, *Faculty of Engineering Technology, Campus Group T*.

105. S. Risteska, A. T. Petkoska, S. Samak, M. Drienovsky, Annealing Effects on the Crystallinity of Carbon Fiber-Reinforced Polyetheretherketone and Polyohenylene Laminate Composites Manufactured by Laser Automatic Tape Placement, *Materials Science (Medziagotyra)*, Vol. 26, No. 3. 2020, ISSN 1392–1320.

106. Lamontia, M.A., Gruber, M.B., Tierney, J.J., Gillespie, Jr.J.W., Jensen, B.J., Cano, R.J. Modelling the Accudyne Thermoplastic in Situ ATP process *In: Proceedings of SAMPE conference 23-24 March, 2009*.

107. Hayes, B.S., Gammon, L.M. Optical Microscopy of Fiber-Reinforced Composites – Chapter 1: Introduction Composite Materials and Optical Microscopy, ASM International, Materials Park, Ohio 44073-0002, 2010.

www.asminternational.org

108. Paciornik, S., D'Almeida, J.R.M. Measurement of Void Content and Distribution in Composite Materials through Digital Microscopy *Journal of Composite Materials* 43 (2) 2009: pp 101 – 112. <https://doi.org/10.1177/0021998308098234>.
109. Image J program developed at the National Institutes of Health (NIH) <https://en.wikipedia.org/wiki/ImageJ>
110. ASTM D 792. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement.
111. W.J.B. Groupe, Weld strength of laser-assisted tape-placed thermoplastic composites, PhD Thesis, University of Twente, Enschede, the Netherlands, August 2012. ISBN 978-90-365-3392-8; DOI 10.3990/1.9789036533928.
112. Mattia Di Francesco, Laura Veldenz, Giuseppe Dell'Anno, Kevin Potter, Heater power control for multimaterial, variable speed Automated Fibre Placement, *Composites: Part A* (2017), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.015>.
113. W. J. B. Groupe, L.L. Warnet, R. Akkerman, Towards a process simulation tool for the laser assisted tape placement process, *14th European conference on composite materials*, 7-10 June 2010, Budapest, Hungary. Paper ID: 065-ECCM14.
114. P. H. Dara and A. C. Loos. Thermoplastic matrix composite processing model Technical Report 24061, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, **1985**.
115. P. G. De Gennes. Reptation of a polymer chain in the presence of fixed obstacles. *Journal of Chemical Physics*, 55(2):572–579, **1971**.
116. J.-F. Lamèthe, P. Beauchêne, and L. Léger. Polymer dynamics applied to PEEK matrix composite welding. *Aerospace Science and Technology*, 9(3):233–240, **2005**.
117. C. J. G. Plummer, P. E. Bourban, J. E. Zanetto, G. D. Smith, and J. A. E. Månson. Nonisothermal fusion bonding in semicrystalline thermoplastics. *Journal of Applied Polymer Science*, 87(8):1267–1276, **2003**.
118. J. E. Zanetto, C. J. G. Plummer, P. E. Bourban, and J. A. E. Månson. Fusion bonding of polyamide 12. *Polymer Engineering and Science*, 41(5):890–897, **2001**.
119. N. Amanat, C. Chaminade, J. Grace, D. R. McKenzie, and N. L. James. Transmission laser welding of amorphous and semi-crystalline poly-ether-ether-ketone for applications in the medical device industry. *Materials and Design*, 31:4823–2830, **2010**.
120. Ozan Celik, Daniel Peeters, Clemens Dransfeld, Julie Teuwen. Intimate contact development during laser assisted fiber placement: Microstructure and effect of process

parameters, *Composites Part A* 134 (2020) 105888, pp. 1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105888>.

121. Samak Samoil, Vladimir Dukovski, Svetlana Risteska, Sase Trajkoski, (2020) *Some Experimental Investigation of Products from Thermoplastic Composite Materials Manufactured with Robot and LAFP*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 9 (Issue). ISSN 2278-0181.

10. ПРИЛОЗИ

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

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

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

Прилог 2. Фишеров критериум

Табела за F-статистика, P = 0,05

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

Прилог 3. Студентов критериум

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