



РЕПУБЛИКА МАКЕДОНИЈА
УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ
ШКОЛА ЗА ДОКТОРСКИ СТУДИИ

ШКОЛА ЗА ДОКТОРСКИ СТУДИИ

**Пријава за
јавна презентација за учество на годишна конференција во летен семестар во
академската 2018/19 година
(за стекнување 2 кредити)**

Студент	Сара Сребренкоска
Број на индекс	35
Ментор	Проф. Д-р Владимир Дуковски
Студиска програма	Производно инженерство
Студиска подпрограма	Производно машинство, технологии и системи
Поле на истражување	Производно машинство, технологии и системи
Тема на докторската дисертација	Роботизирани AFP/ATL процеси за производство на делови од композитни материјали
Наслов на трудот за годишната конференција	Истражувања на технолошките параметри за автоматизиран ATL процес со примена на ласер
Конкурс на запишување на докторски студии	Во академска 2017/2018 година
Број на остварени кредити	26
Забелешка	

Прилог: Извештај од рецензентската комисија за трудот кој се презентира

Ментор
Проф. д-р Владимир Дуковски

Студент
Сара Сребренкоска

Скопје, 29.03.2019г.

УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ
ШКОЛА ЗА ДОКТОРСКИ СТУДИИ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
Студиска програма: Производно инженерство

Кандидат: Сара Сребренкоска

Број на индекс: 35

Вработен во: Машински факултет, Универзитет Гоце Делчев во Штип

Ментор: Д-р Владимир Дуковски, редовен професор

Студиска година: втора

ИСТРАЖУВАЊА НА ТЕХНОЛОШКИТЕ ПАРАМЕТРИ ЗА АВТОМАТИЗИРАН
ATL ПРОЦЕС СО ПРИМЕНА НА ЛАСЕР

КУСА СОДРЖИНА

Економично производство на современи композити со добар квалитет може да се постигне преку автоматизација. Автоматизирано поставување на траки (Automated Tape Laying - ATL) и автоматско поставување на влакна (Automated Fibre Placement - AFP) се две главни технологии кои се користат за производство на современи композитни ламинати. Примена на ласерско греење нуди предности за овие процеси и се користи при автоматското поставување на термопластичен препрег.

Во рамките на овој труд презентирани се технолошките параметри на производниот ATL/AFP процес со примена на ласер кои ќе овозможат добивање на композитна структура на самото место, без дополнително процесирање во традиционална автоклав печка или во преса (што вообичаено се применува). Точните технолошки параметри за време на поставувањето може да имаат значително влијание врз механичките карактеристики на крајниот производ - композитен ламинат.

Во рамките на овој труд произведени се композитни ламинати со примена на ATL процесот со ласер врз основа на два типа термопластичен препрег и процесирани на различна температура и различна ласерска оптика. Направени се истражувања за својствата на двата типови препрег материјали и направено е тестирање на одредени механички карактеристики на добиените композитни ламинати. Врз основа на добиените резултати донесени се заклучоци за влијанието на типот на препрег и температурата при ATL процесот врз квалитетот на композитните ламинати.

Клучни зборови: автоматизација, поставување, препрег, ламинати.

ABSTRACT

Highly consistent quality and cost-effective manufacture of advanced composites can be achieved through automation. Automated Tape Laying (ATL) and Automated Fibre Placement (AFP) are two main technologies used to automate the layup of unidirectional prepreg to manufacture advanced composite laminates. Heat input by means of laser heating offers advantages for these processes and it is well established in automated laying of thermoplastic prepreg. The presented work reviews the technological parameters of automate tape laying process with laser heating, which will enable the obtaining of a composite structure on the spot, without further processing into a traditional autoclave furnace or in a press (which is usually used). The exact technological parameters during layup may have a significant impact on the mechanical performance of the final laminate.

In the frame of this work, composite laminates based on two types of thermoplastic prepreg and processed at different temperatures and different laser optics were produced by using laser assisted ATL process. The properties of the two types of prepreg materials has been tested and some mechanical properties of the obtained composite laminates has been performed. Based on

the obtained results, conclusions for the influence of the temperature and laser optic in the ATL process on the quality of composite laminates were made.

Keywords: automation, lay-up, prepreg, laminates.

1. ВОВЕД

Како што постои развој во индустријата за машински алати со тоа што голем број 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.

Најчесто за добивање на високоперформансни композитни структури се користи процес со рачното полагање на слоеви од композитен препрег. Врз основа на тоа каква композитна структура треба да се добие, слоевите од композитниот препрег се дефинираат и дизајнираат, а потоа се пренесуваат на соодветен алат за нивно отсекување. Откако ќе се отсечат, секој слој рачно се позиционира во калап, а потоа следи обликување на структурата со помош на компресионо пресување или во автоклав печка. 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 произведен 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 високо перформансни структури особено такви наменети за авионската и автомобилска индустрија, применуваат други поефикасни техники, како што е производниот процес со автоматско полагање на влакна или ленти. Суштината на производниот процес се состои во автоматско полагање на слоеви, нивно спојување се до формирање на крајната структура. За автоматското полагање на слоевите или влакната се користи робот за да ги насочи лентите на претходно дефинирани патеки, а тоа дозволува голема слобода во дизајнирањето на крајниот производ. Овој произведен процес има голем потенцијал за флексибилно и автоматско производство на лесни и високи перформанси структури односно има висока продуктивност, а притоа ниска потрошувачка на енергија. Автоматизацијата на процесите ги намалува трошоците за работна сила, како и трошоците поврзани со отпад и материјална загуба поради човечки грешки. Автоматското полагање на ленти претставува една од поновите производни процеси кои сеуште се истражуваат и унапредуваат, а се атрактивна технологија за авионската индустрија [1,2]. На слика 1 претставени е автмат

Термините *tape placement*, *fiber placement* и *tape laying*, генерално се однесуваат на ист или тесно поврзан произведен процес со поставување на влакна или поставување на ленти. Разликата меѓу *laying* и *placement* се однесува на сложеноста на геометријата на поставеност. Првиот термин се употребува за да го опише процесот на поставување на широк препрег на (повеќе или помалку) рамна површина, додека вториот термин се однесува на поставување на група на повеќе тесни препрег ленти на посложени геометрии [3-5]. Аналогно на тоа, производниот процес со автоматско полагање на танки ленти препрег со точна широчина е познат како AFP технологија (Automate **Fiber Placement** technology) додека производниот процес со автоматско полагање на пошироки траки или ленти препрег е познат како ATL технологија (Automate **Tape Laying** technology). На слика 1 претставена е ATL/ AFP технологија.



Сл. 1. Приказ на процесот AFP/ ATL со помош на ласер [2]

Најчесто, композитните структури со високи перформанси се добиваат врз основа на зајакнувачки влакна и терморективни полимерни матрици. 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 [6].

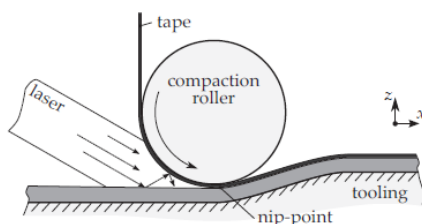
Денес постојат многу производители на ATL/AFP опрема во светот за добивање на терморективни композити. Придобивките од примената на ATL/AFP технологијата е следната: заштеда на материјал и работна сила, подобрување на квалитетот, точно поставување на влакна под било кој агол, автоматско отстранување. Меѓутоа, кога се работи со терморективни композити постои уште еден чекор на доработка кој вклучува примена на скап автоклавен циклус или преса. Ваквиот произведен процес е енергетски неефикасен, одзема време, прави прекин со земање и печење на терморективните композити. 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). Така, развојот на произведен процес *надвор од автоклав* претставува предизвик во истражувањата во оваа област, а целта е да се елиминира дополнителниот процес на печење на материјалот со примена на скапа опрема – систем со автоклав печка. Тоа може да се постигне кога се врши автоматско полагање на термопластични ленти зајакнати со влакна [7,8,9]. Термопластичните композити имаат многу предности во споредба со терморективните композити, а тоа се: процесирање со топење, голема цврстина и отпорност од оштетувања, добра хемиска отпорност, може да се рециклираат, имаат ниска апсорпција на влага, стабилна температура на стаклосување Tg на топло/влажни услови, добра отпорност на замор, низок коефициент на триење, голема отпорност на абразија. Покрај многу предности што имаат термопластичните композити, сепак, нивното пробивање како компоента за високо перформанси структури се одвива побавно и сеуште постојат бројни истражувања за нивна апликација. 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 втврднува што дозволува примена на технологии за брзо формирање како што е формирањето со компресионо пресување. Од друга страна, технологијата за поставување на ленти има огромен потенцијал за автоматизација [9-11]. Термопластичните ленти после автоматското полагање и таложење на слоевите се консолидираат во автоклав, за што е потребно дополнително енергија. 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 контролира со висок степен на точност. Ласерското загревање овозможува висока продуктивност, но и покрај тоа, производниот процес со автоматското полагање на ленти 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 пак доведуваат до материјални трошоци [9,12,13].

2. ВЛИЈАНИЕ НА ТЕХНОЛОШКИТЕ ПАРАМЕТРИ ВО АВТОМАТИЗИРАН ATL/AFP ПРОЦЕС СО ПРИМЕНА НА ЛАСЕР

Перформансите на крајната композитна структура зависат од голем број на различни фактори. На пример, точноста со која се положуваат лентите е еден од влијателните фактори затоа што одредува дали лентите се преклопуваат или има празнини меѓу нив или се позиционирани една до друга. Исто така, постоењето на пори (празнини) е важен параметар затоа што доведува до развивање на внатрешното напрегање. Степенот на кристалност на полимерната матрица во крајната композитна структура игра важна улога и влијае врз перформансите на истата. Друг многу важен фактор е јачината на врската

меѓу слоевите (положените ленти) односно интерфејсот што пак го овозможува трансфер на напрегањето во структурата, како и други параметри од кои зависи квалитетот на крајниот производ [2, 5, 14].

На Слика 2 [9] шематски е претставен процесот на поставување на лента. Се состои во автоматско таложење (редење на слоеви еден над друг) на термопластични ленти зајакнати со влакна на искривен алат. Лентите се поврзуваат со примена на топлина и притисок. Притисокот се применува и обезбедува со помош на компактен ролер, додека топлината се обезбедува со користење на топол гас или ласер. Во оваа постапка се користи робот за поставување на лентите по претходно дефинирани патеки, а што овозможува висок степен на слобода при дизајнирање на финалниот производ. 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. Пост – консолидацијата претставува дополнителен чекор и се прави со помош на автоклав, а следи после полагањето на лентите.

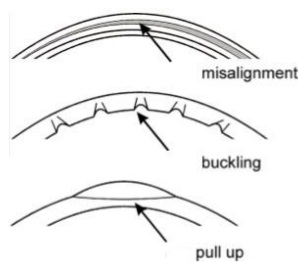


Сл. 2. Шематски приказ на процесот AFP/ ATL со помош на ласер [9]

Процесот на поставување лента со помош на ласер (LATL) се заснова на тоа што ласерот ја загрева лентата и ламинатот. Примената на ласерското греење има некои предности во однос на алтернативните извори на топлина, како што е топлиот гас. Две најважни предности се високата енергетска густина 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 поставување. Сепак, примената на ласер, исто така, има свои недостатоци. Трошоците за опремата се високи во споредба со конвенционалните извори на топлина, а исто така, ласерот секогаш бара опремата да биде сместена во заштитено опкружување. Дополнително, примената на ласерско греење бара темелно разбирање на интеракцијата на светлината со термопластичните ленти зајакнати со влакна (препрези) [9, 15, 16].

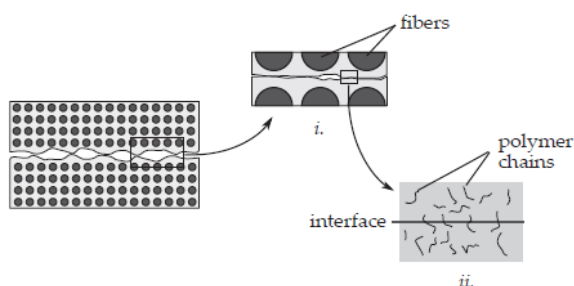
Процесот на поставување лента со помош на ласерот се карактеризира со исклучително кратко време за поврзување (слепување) и консолидација на термопластичните ленти. На пример, времето на процесирање е помалку од 25 ms кога брзината на поставување е 200 mm/s и должина на контакт е 5 mm помеѓу ролерот и ламинатот. Меѓутоа, материјалот е подложен на екстремно високи чекори на греење и ладење со цел да се постигнат овие кратки временски времиња на процесирање. Така овие високи стапки на ладење можат значително да влијаат на постоењето на дефекти во крајната структура. Во принцип, постојат три главни дефекти кои може да се јават кај ламинатите при автоматското полагање на ленти со помош на ласер, прикажани на слика 3. Како резултат на тоа, крајните својства може да се разликуваат во споредба со својствата на конвенционално (и бавно) произведените производи, што може да ја попречи примената на утврдените правила за дизајн [17].

Интерламинарното сврзување на термопластичните ленти игра важна улога во процесите AFP/ ATL на поставување ленти, но исто така и во голем број други техники за производство на композити, како што е консолидација со примена на автоклав и разните методи на поврзување (welding).



Сл. 3. Преглед на често појавувани дефекти (преклопување, набирање, повлекување, неусогласеност, свиткување и сл.) [1]

Процесот на поврзување на слоевите шематски е прикажан на слика 4 [9]. Според литературни податоци, тој се состои од два различни, но истовремено очекувани феномени: а. Интимен контакт – кој мора да се постигне помеѓу слоевите и б. интермолекуларна дифузија - процес кој е исто така познат како вмрежување (curing) и се одвива помеѓу површините во интимниот контакт.



Сл. 4. Интерламинарно поврзување на термопластични препрег ленти: лентите се доведуваат во контакт, по што i. се развива интимен контакт и ii. се случува интердифузија на полимерни синџири [9]

Развојот на интимниот контакт, кој е предуслов за поврзување, се состои од изедначување на нерамнините на лентата и на алатот. Почетните површински нерамнини се деформираат под дејство на топлина и притисок. Времето потребно за постигнување на интимен контакт зависи од почетната грубост (нерамнини) на површините, приложениот притисок и вискозитетот на матрицата. Поради температурна зависност на вискозитетот, зголемувањето на температурата го олеснува развојот на интимен контакт. Во регионите каде што е постигнат интимен контакт, интердифузијата на полимерните вериги се јавува поради случајно (random) термичко движење. Процесот на интердифузија генерално се објаснува 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 семи кристални 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 поставувањето 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 поставување на термопластични ленти и нивно поврзување со ласерско греење. Процесот на поставување лента со помош на ласерот е со сензори за температура и притисок, со цел да се мери температурата и притисокот на интерфејсот. Врз основа на запишаните температури и притисоци може да се предвиди и пресмета добиената сила [19-21].

Најважни параметри кои влијаат на автоматизираните AFP/ ATL процеси на поставување на ленти со помош на ласер се :

- **Параметар температура и притисок** – при овие процеси многу важно е правилно да се загрее и доволно да се притисне допирната површина односно интерфејсот и да се обезбеди консолидација од неколку секунди.

- **Параметар време** - овие се процеси во кои се применува ласер и се различни од процесите каде се применува автоклав и каде што има термички третман кој трае неколку часови за да се постигне добра консолидирација. Параметарот време е многу важен фактор бидејќи консолидацијата треба да трае само неколку секунди.
- **Параметар интензитет и моќност на ласер** - ласерите може да донесат многу висок топлотен флукс на одредена, насочена област - на тоа мора да се внимава.
- **Параметра тип на ласер** - современите диодни ласери имаат висок приклучок во ефикасноста (~ 45%) и мал отпечаток.
- **Параметар тип на оптика (различни леќи)** - оптиката може да се користи за менување на геометријата на зраците.

Овие параметри се најважни параметри кои најмногу се проучуваат и подобруваат се со цел да се зголеми продуктивноста и апликација на термопластичните препрези. Покрај тоа, примената на ласерското греење бара темелно разбирање на интеракцијата на светлината со термопластичните препрег материјали [19,20].

За добивање на крајна композитна структура со добри карактеристики постои комплексен однос помеѓу параметрите за обработка, својствата на материјалот и силата на поврзување (интерфејсот). Важно е да се направи добар дизајн на процесот врз основа на проучувањето на параметрите на истиот, а при тоа да се обезбеди добар интерфејс на термопластичните препрег ленти. Со користење на топлинска камера може да се следи целиот процес. Опремата на процесот на поставување лента со помош на ласер, овозможува варијации на: **моќта на ласерот, компактниот притисок, брзината на поставување и аголот на ласерот**. Исто така многу важно е да се обезбеди добра распределба на ласерската светлина помеѓу лентата и ламинатот. За тоа потребно е да се направи детална термичка анализа за да се предвиди прецизна термичка историја на интерфејсот [6, 9, 12]. Тоа го опфаќа следното:

а) Интимен контакт на термопластичната лента и ламинатот може да се развие само под компактниот ролер, бидејќи потребен е притисок за да се деформираат површинските слоеви. Интимниот контакт вклучува поврзување на двете површини под дејство на топлина и притисок така што полимерната матрица на секоја површина е во директен контакт. Откако ќе се постигне интимен контакт, полимерните вериги дифузираат помеѓу двата слоја преку топлински вибрации и формираат врска. На крај зоната каде што е врквата се лади под притисок и се постигнува кохезивна (термопластична фузија) врска.

б) Времето на поврзување/слепување и времето потребно за интердифузија на полимерните молекули се намалува со зголемување на температурата.

в) Температурата на интерфејсот може да се зголеми со зголемување на моќта на ласерот или со намалување на брзината.

д) Зголемувањето на моќта на ласерот или намалувањето на брзината на поставување се смета дека може да ја подобри интерфејсната јачина на поврзување на ламинатните термопластични слоеви.

е) Високите температури го олеснуваат интерламинарно поврзување од една страна, но исто така, може да влијаат на термичката стабилност на термопластот и да доведат до деградација на полимерот или до вмрежување, а тоа негативно влијае на јачината на спојување на термопластичните ленти [9, 12, 21].

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН ДЕЛ

Материјали

За експерименталните тестови беа користени се ендонасочни односно унидирекционални препрег ленти (УД ленти) врз основа на јаглородни влакна и термопластична матрица. Препрег претставува полупроизвод кој се состои од зајакнувачки влакна и полимерна матрица која може да биде термореактивна и термопластична. Овој материјал може дополнително да се процесира на одредена температура во зависност од полимерната матрица и соодветен притисок при што се формира композитна структура со одредени

јакостни карактеристики. Препрег материјалот може да се добие со импрегнација на влакната со полимерна матрица или да се набави како готов комерцијален производ. Препрегот може да биде достапен во различни форми како унидирекционален препрег добиен со импрегнација на еднонасочни влакна или препрег добиен со импрегнација на соодветен тип на платно врз основа на стаклени, јаглеродни, полиамидни, арамидни влакна и др. За истражувањата во рамките на овој труд користени се два типа комерцијални унидирекционални (УД) термопластични препрег ленти, набавени од производителот Suprem и тоа:

- Термопластичен УД препрег PEEK/CF (препрег врз основа на еднонасочни јаглеродни влакна и термопластична матрица: полиетеретеркетон).
- Термопластичен карбонски препрег PPS/CF (препрег врз основа на еднонасочни јаглеродни влакна и термопластична матрица: полифенилен сулфид).

Двата типови унидирекционални препрег ленти се врз основа на јаглеродни влакна тип AS4 со радиус на влакно $1,378 \times 10^{-4}$ in, Јунгов модул на еластичност 241 GPa и локализирана јачина на влакно 5419 MPa и се со ширина од 25 mm и истите се користат со таа ширина во ATL процесот. Карактеристиките на препрег лентите се дадени во табела 1.

Таб. 1. Карактеристики добиени од производителот Suprem за УД препрег материјалите

Трговско име	Suprem T60% AS4/PEEK-150	Suprem T60% AS4/PPS-214	
Карактеристики	Единица	Вредност	Вредност
Површинска маса	[g/m ²]	300	300
Линеарна тежина	[g/m]	5,148	5,148
Волуменски процент на влакна	[%]	60,00	60,00
Масен процент на влакна	[%]	67,38	66,54
Линеарна тежина на полимер	[g/m]	2,493	2,588
Ширина на трака	[mm]	25,00	25,00
Дебелина на трака	[mm]	0,19	0,19
Линеарна маса на трака	[g/m]	7,541	7,736
Густина на трака	[g/cm ³]	1,594	1,614
Должина на шуплина	[m]	980	980
Маса на шуплина	[g]	7,488	7,582
Јачина при истегнување (0°)	MPa	2,231	2,231
Модул на еластичност при истегнување (0°)	GPa	132	132
Јачина при истегнување (90°)	MPa	65	65
Модул на еластичност при истегнување (90°)	GPa	9,6	9,6

Добивање на композитни ламинати со ATL процес со помош на ласер

Со помош на автоматска машина на полагање на термопластични ленти со ласер, се произведоа композитни ламинати од двата типови на препрег (слика 5). Композитните ламинати беа произведени на различна температура и со примена на различна ласерска оптика при брзина на поставување од 7m/min и сила на притисок на ролер од 289 N. Сите произведени ламинати се состојат од 6 слоеви ленти препрег. Во табела 2 се дадени параметрите кои се користеа за производство на композитите и ознаките на примероците.



Сл. 5. Производство на композитни ламинати и добиени примероци за тестирање

Таб.2. Технолошки параметри за производство на примероци со ATL процес

Тип на материјал	Ознака на примерок	Температура на процесирање (°C)	Тип на оптика за ласер
PEEK/CF	1	400	LL2.20/LL2.10 68 x34mm ² f:300mm
	2	420	LL2.20/LL2.10 56 x28mm ² f:250mm
PPS/CF	3	330	LL2.20/LL2.10 68 x34mm ² f:300mm
	4	350	LL2.20/LL2.10 56 x28mm ² f:250mm

Методи

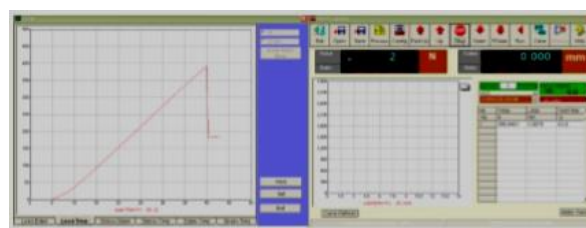
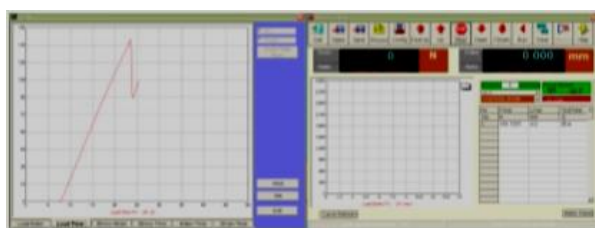
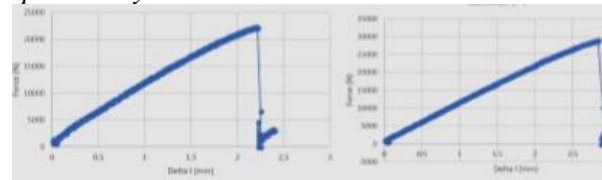
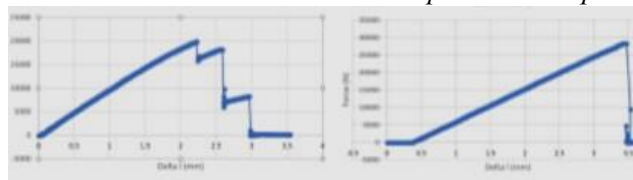
Според стандардот ASTM D 3171 беше определен волуменски и масен удел на конституентите на препрег лентите, беше пресметана теоретската густина и беше определена површинската маса. Беа тестирани некои механички особини на произведените композитни ламинати на универзална машина за испитување. Имено, беше испитана јачина на свиткување со модул на еластичност според стандардот ASTM D 790 и јачина на истегнување со модул според ASTM D 3039.

4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Во табела 3 дадени се резултатите од испитаните карактеристики на препрег материјалите. На слика 3 дадени се подготвените примероци за тестирање (по пет примерока од сите 4 различни типови композитни ламинати) според соодветниот стандард за јачини на свиткување и истегнување, а на слика 4 се дадени некои од добиените криви сила – време и сила - поместување од универзалната машина за тестирање. Врз основа на добиените резултати пресметани се јачините и модулот на еластичност за сите типови ламинати. Во табела 4 дадени се резултатите од испитувањата на механичките карактеристики кои претставуваат средни вредности од пет репликации за секој примерок.

Таб. 3. Испитани карактеристики на УД препрег материјалите

Тип на УД препрег лента	% wt. Јаглородни влакна	% vol. Јаглородни влакна	$\rho_{\text{теор.}}$ (g/cm ³)	$\rho_{\text{с експ.}}$ (g/cm ³)	Површинска маса (g/m ²)	Јачина (MPa)	Модул (GPa)
PEEK/CF	66,81	59,39	1,591	1,3314	203,2	2255,9	96,1
PPS/CF	65,72	59,67	1,613	1,3549	205,1	2146,7	94,4

*криви сила – време при свиткување**криви сила – поместување при истегнување***Сл. 4. Добиени криви од Универзалната машина за тестирање**

Врз основа на добиените резултати може да се забележи дека параметарот температура како и типот на оптика на ласерот имаат значајно влијание врз перформансите на композитните ламинати.

Таб. 4. Добиени резултати од механичките тестирања на примероците

Примерок	Испитувања при свиткување		Испитувања при истегнување	
	Јачина (МПа)	Модул (GPa)	Јачина (МПа)	Модул (GPa)
1	786,2	27,8	1383,9	78,3
2	1088,1	63,2	1891,1	112,4
3	765,3	29,5	1605,0	88,1
4	1066,0	75,0	2213,2	121,4

Имено, повисоката температура дава подобра консолидација и слепување на слоевите препрег, а тоа резултира во повисоки јачини на свиткување и истегнување кај композитите. Примената на повисока температура за 20 °C и промената на ласерска оптика доведе до добивање на композитни ламинати со приближно 40% повисоки вредности за механичките перформанси.

5. ЗАКЛУЧОК

Врз основа на направениот преглед на литература дефинирани се основите на автоматизираните ATL/AFP процеси и истакнати се предностите од примена на истите во производство на современи композитни структури наменети за автомобилска и авионска индустрија. Исто така, презентиранио е влијанието на сите технолошки параметри на ATL/AFP процеси за добивање на високо перформансна композитна структура. Во рамките на овој труд направени се експерименти за определување на влијанието на температурата и изборот на ласерска оптика во добивање на композитни ламинати со добри механички перформанси врз основа на два типа термопластични препрези. Добиените резултати покажаа дека температурата и оптиката значајно влијаат врз механичките карактеристики на ламинатите. Имено, повисоката температура и соодветниот избор на ласерска оптика при автоматско поставување на термопластичен препрег резултира во повисоки јачини кај ламинатите. Тоа значи дека точните технолошки параметри за време на поставувањето на препрег слоевите имаат значително влијание врз механичките карактеристики на композитниот ламинат.

Многу истражувања се направени за развој на роботизирани AFP/ATL процеси за производство на делови од композитни материјали со крајна цел за нивна индустриска примена. Погolem дел од истражувањата се направени за примена на автоматизирани процеси како замена на конвенционалните техники за производство на композити. Така, постигнат е голем напредок, меѓутоа сеуште претставуваат предизвик за истражувања особено процесите за полагање на термопластичните ленти.

Понатамошна работа во оваа област ќе биде насочена кон примена на математичко моделирање на автоматизираните AFP/ATL процеси и определување на оптимални технолошки параметри за добивање на високо преформансна композитна структура. Исто така, ќе биде анализирано влијанието на различните производни услови врз механичките и микроструктурните карактеристики на ламинатите.

6. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] Dirk H.-J. A. Lukaszewicz, Carwin Ward, Kevin D. Potter. „The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future“. *Composites Part B: Engineering* 43 (2012) pp. 997–1009.
- [2] A. J. Comer, D. Ray, W.O. Obande, et al. „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.
- [3] E. Beyeler, W. Phillips, S. I. Güçeri. „Experimental Investigation of Laser-Assisted Thermoplastic Tape Consolidation“. *Journal of thermoplastic composite materials* 1 (1988) 1, pp. 107–121.

- [4] R. Schledjewski. „Thermoplastic tape placement process – in situ consolidation is reachable“. *Plastics, Rubber and Composites* 38 (2009) 9–10, pp. 379–386.
- [5] A. Yousefpour, M. N. Ghasemi Nejhad. „Experimental and Computational Study of APC-2/AS4 Thermoplastic Composite C-Rings“. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 14 (2001) 2, pp. 129–145.
- [6] C.M.M. Pistor, M.A. Yardimci, S.I. Güçeri. „On-line consolidation of thermoplastic composites using laser scanning“. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 30 (1999) 10, pp. 1149–1157.
- [7] 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 (2010) 2, pp. 98–111.
- [8] F. Rosselli, M.H. Santare, S.I. Güçeri. „Effects of processing on laser assisted thermoplastic tape consolidation“. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 28 (1997) 12, pp. 1023–1033.
- [9] Grouve, Wouter. “Weld Strength of laser-assisted tape-placed thermoplastic composites”, *PhD Thesis*, University of Twente, Enschede, the Netherlands, August 2012, ISBN 978-90-365-3392.
- [10] F.O. Sonmez, M. Akbulut. „Process optimization of tape placement for thermoplastic composites“. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38 (2007) 9, pp. 2013–2023.
- [11] S. M. Grove. „Thermal modelling of tape laying with continuous carbon fibre-reinforced thermoplastic“. *Composites* 19 (1988) 5, pp. 367–375.
- [12] R. Pitchumani, J.W. Gillespie, M.A. Lamontia. „Design and Optimization of a Thermoplastic Tow- Placement Process with In-Situ Consolidation“. *Journal of Composite Materials* 31 (1997) 3, pp. 244–275.
- [13] Z. August, G. Ostrander, J. Michasiow, et al. „Recent developments in automated fiber placement of thermoplastic composites“. *SAMPE Journal* 50 (2014) 2, pp. 30–37.
- [14] B. Chern, T.J. Moon, J.R. Howell. „On-Line Processing of Unidirectional Fiber Composites Using Radiative Heating: II. Radiative Properties, Experimental Validation and Process Parameter Selection“. *Journal of Composite Materials* 36 (2002) 16, pp.1935–1965.
- [15] W. J. B. Grouve, L. L. Warnet, B. Rietman, et al. „Optimization of the tape placement process parameters for carbon–PPS composites“. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 50 (2013) pp. 44–53.
- [16] F. O. Sonmez, H. T. Hahn. „Analysis of the On-Line Consolidation Process in Thermoplastic Composite Tape Placement“. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 10 (1997) 6, pp. 543–572.
- [17] C. Werdermann, K. Friedrich, M. Cirino, et al. „Design and Fabrication of an On-Line Consolidation Facility for Thermoplastic Composites“. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 2 (1989) 4, pp. 293–306.
- [18] V. Agarwal, R.L. Mccullough, J.M. Schultz. „The Thermoplastic Laser-Assisted Consolidation Process-Mechanical and Microstructure Characterization“. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 9 (1996) 4, pp. 365–380.
- [19] 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“. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 78 (2015) pp. 274–283.
- [20] C. M. Stokes-Griffin, P. Compston. „A combined optical-thermal model for near-infrared laser heating of thermoplastic composites in an automated tape placement process“. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 75 (2014) pp. 104–115.
- [21] C. M. Stokes-Griffin, P. Compston. „Optical characterisation and modelling for oblique near-infrared laser heating of carbon fibre reinforced thermoplastic composites“. *Optics and Lasers in Engineering* 72 (2015) pp. 1–11.