
**FUNCTIONAL DEPENDENCE OF LASER POWER AND LAYUP SPEED FOR
AUTOMATIC FIBRE PLACEMENT TEMPERATURE CONTROL**

Dijana CvetkoskaMikrosam DOO, Republic of North Macedonia, dijanac@mail.mikrosam.com**Filip Kochoski**Mikrosam DOO, Republic of North Macedonia, filipk@mail.mikrosam.com

Abstract: Automated Fiber Placement (AFP) is a relatively new technology that has revolutionized the production of composite structures in the aerospace and space industries for more than two decades and is nowadays increasingly used in new industries such as the wind energy. Generally, the AFP machine consists of an automatic manipulator (robot) on which a layup head is fixed for laying multiple individual composite strips at once (certainly not excluding the possibility of laying a single wider tape when it comes to Automatic Tape Placement). The layup process is performed on a mandrel or tool with a certain geometric shape. The laying head should at least include a feeder, a cutting mechanism, a compaction mechanism (usually roller) and a certain type of heater (depending on the material type). Conventionally, three types of composite materials are used in combination with AFP technology: continuous fibers reinforced with thermoset resin (usually epoxy resin), same continuous fibers reinforced with thermoplastic resin as well as bonded continuous carbon fibers. Depending on the type of material this technology uses various types of heat sources in order to achieve a good adhesion to the individual fibers that are deposited in the laying process and the pre-laid composite layers. Thermoplastic pre-impregnated material requires high temperature to reach degree of melting of the resin used to achieve complete 'welding' with the previous layers. The melting temperature varies for different materials and ranges from 130°C to 200°C for low melting thermoplastics (such as Polyamide PA and Polypropylene PP), 280°C to 350°C for Polypropylene Sulfide (PPS) up to 400°C - 450°C for Polyether Ether Ketone (PEEK). For more than two decades, hot gas torches have been used for thermoplastic layup - not a very expensive system but very difficult to control. One of the newer sources of heat close to infrared radiation ($\lambda = 0.9-1.1 \mu\text{m}$) is diode laser heating. This research presents a simple thermal model of the process which correlates the heater power and the layup speed with the temperature of the heating area. The deposition temperature was measured over a range of heater powers and layup speeds. The experimental data is used to define and validate a thermal model for thermoplastic material used in conjunction with a diode laser: carbon fibre reinforced thermoplastics PEEK. This enables open-loop, speed dependent heater power control, based on defining and programming the speed dependent heater power function in the machine controls. Obtained functional dependency was implemented in the AFP machine control system and tested for production of several plates with different layup angles. The achieved temperature during layup process is monitored on the thermal camera and through several pyrometers.

Keywords: power, velocity, temperature, automated fibre placement (AFP), thermoplastic material

**ФУНКЦИСКА ЗАВИСНОСТ НА МОЌНОСТА НА ЛАСЕРОТ И БРЗИНАТА НА
ПОЛАГАЊЕ ЗА КОНТРОЛА НА ТЕМПЕРАТУРА ПРИ АВТОМАТСКО
ПОЛАГАЊЕ НА ТЕРМОПЛАСТИЧЕН ПРЕПРЕГ****Дијана Цветкоска**Микросам ДОО – Прилеп, Република Северна Македонија, dijanac@mail.mikrosam.com**Филип Кочоски**Микросам ДОО – Прилеп, Република Северна Македонија, filipk@mail.mikrosam.com

Резиме: Automated Fiber Placement (AFP) претставува релативно нова технологија која веќе подолго од две децении го револуционизира производството на композитни структури во авионската и вселенската индустрија, и во денешно време се повеќе се застапени во нови индустрии како што е индустријата на ветерна енергија. Генерално, AFP машината се состои од автоматски манипулатор (роботска или гантри конструкција) на кој што е прицврстена глава за полагање на повеќе индивидуални композитни траки одеднаш (секако не се исклучува можноста од полагање на една поширока трака кога во суштина станува збор за Автоматско полагање на трака ATL технологија). Полагањето се врши врз мандрел односно алат со одредена геометриска форма. Главата за полагање во најмала рака треба да вклучува механизам за дотур на

трака (гатер), механизам за сечење, механизам за компакција (вообичаено ролер) и одреден тип на греач (зависно од типот на материјал). Конвенцијално, три типови на композитни материјали се користат во комбинација со AFP технологија: континуирани влакна зајакнати со термосет смола (најчесто епоксидна смола), исто континуирани влакна зајакнати со термопластична смола како и врзани непрекинати јаглеродни влакна. Зависно од типот на материјалот оваа технологија користи различни типови на извори за загревање со цел да се постигне добра поврзаност (адхезија) на одделните влакна кои се дотураат во процесот на полагање и предходно положените слоеви композит. Термопластичниот пре-импрегниран материјал бара висока температура која треба да го достигне степен на топење на смолата која се користела со цел да се постигне комплетно 'заварување' со предходните слоеви. Температурата на топење варира за различни материјали и се движи во ранг од 130°C до 200°C за термопласти со низок степен на топење (како што се Полиамид PA и Полипропилен PP), 280°C до 350°C за Полипропилен Сулфид (PPS) па до 400°C – 450°C за Полиетер Етер Кетон (PEEK). Повеќе од две декади за полагање на термопластичен препрег се користеле факери со топол гас (Hot Gas Torches – HGT) – не многу скап систем но многу тежок за контролирање. Еден од поновите извори на топлина близок до инфрацрвени зраци ($\lambda = 0.9-1.1 \mu\text{m}$) претставува диодното ласерско грење.

Клучни зборови: моќност, брзина, температура, автоматско полагање на препрег, термопластичен материјал

1. ВОВЕД

Automated Fiber Placement (AFP) претставува релативно нова технологија која веќе подолго од две децении го револуционизира производството на композитни структури во авионската и вселенската индустрија, и во денешно време се повеќе се застапени во нови индустрии како што е индустријата на ветерна енергија.

Конвенцијално, три типови на композитни материјали се користат во комбинација со AFP технологија: континуирани влакна зајакнати со термосет смола (најчесто епоксидна смола), исто континуирани влакна зајакнати со термопластична смола како и врзани непрекинати јаглеродни влакна. Зависно од типот на материјалот оваа технологија користи различни типови на извори за загревање со цел да се постигне добра поврзаност (адхезија) на одделните влакна кои се дотураат во процесот на полагање и предходно положените слоеви композит. Термопластичниот пре-импрегниран материјал бара висока температура која треба да го достигне (па понекогаш да оди и повисоко) од степенот на топење на смолата која се користела со цел да се постигне комплетно 'заварување' со предходните слоеви. Температурата на топење варира за различни материјали и се движи во ранг од 130°C до 200°C за термопласти со низок степен на топење (како што се Полиамид PA и Полипропилен PP), 280°C до 350°C за Полипропилен Сулфид (PPS) па до 400°C – 450°C за Полиетер Етер Кетон (PEEK). Повеќе од две декади за полагање на термопластичен препрег се користеле факери со топол гас (Hot Gas Torches – HGT) – не многу скап систем но многу тежок за контролирање. Еден од поновите извори на топлина близок до инфрацрвени влакна ($\lambda = 0.9-1.1 \mu\text{m}$) претставува диодното ласерско грење. Подолу во овој семинарски труд ќе се задржиме на ваквиот начин на полагање на термопластичен препрег.

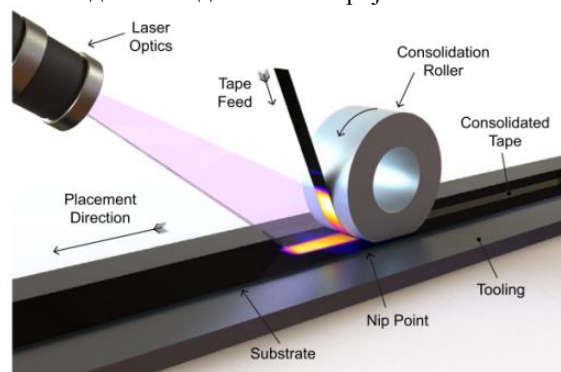
2. ТЕОРЕТСКИ ДЕЛ

Опис на процесот за полагање: Технолошкиот процес на полагање композитни ленти е единствен и комплексен. Основниот композитен материјал кој се употребува во овој процес е унидирекционален препрег - препрег од влакна, и истиот може да биде базиран на стаклени влакна, арамидни влакна или карбонски влакна. Матрицата пак се базира на терморективен или термопластичен смолен систем какви што се епоксидниот, фенолниот смолен систем, PEEK, итн. Овој процес овозможува употреба на различни брзини на полагање композитни ленти, симултано температурно процесирање (загревање или ладење), употреба на притисок за консолидација на препрегот на површината врз која се полага и опции за контрола на индивидуалното движење и засебно независно затегнување на секоја препрег лента.

Како што е покажано во некои експериментални студии при користење на процес на полагање за производство на термопластични композитни делови преовладува проблемот на термална деградација на матрицата поради преголем интензитет на топлина или присуство на пори кое се појавува како резултат на некомплетна консолидација. Она што го прави овој процес тежок е наоѓање на соодветен компромис помеѓу овие две конфликтни побарувања. Добра консолидација на траката се постигнала при брзина од 0.9 m/min, меѓутоа оваа брзина на консолидација е далеку под нивото на потребната брзина за комерцијални апликации. Исто така, на оваа брзина е постигнато и ниско присуство на пори <1% но како што веќе спомнав оваа брзина е невозможно да се користи за одредени комерцијални апликации. Поради ова за да се

постигне поголема продуктивност потребно е да се определи точна и соодветна комбинација на процесните параметри. Моделирањето на процесните параметри значи воспоставување на врска помеѓу процесните променливи и однесувањето на материјалот во дадена производствена околина. Иако постојат теоретски записи за одредување на процесните параметри, во пракса одредувањето на оптималните процесни параметри вообичаено се прави со метод на обиди и грешки.

Опис на процесот за греење и консолидација: Како што е спомнато во воведниот дел, еден од основните предизвици на современото производство и обработка на композитните материјали е разработка и постигнување соодветна доверба во таканаречениот *in situ* процес. Изворот на топлина (диоден ласер) се користи за да ги загрее двете површини (траката која се дотура и положената површина) во близина на точката на допир (*nip point*). Двете стопени површини се притискаат како што поминува ролерот преку нив создавајќи цврста врска. Ваквиот фундаментален процес на додавање сила при интерна дифузија на полимерните молекули на интерфејсот кој ги поврзува е високо температурно зависен процес познат како лекување или автохезија (*healing or autohesion*). Автохезија може да настане само во региони на интимен контакт, поради што силата на поврзувањето претставува развоен процес кој што е комбинација на соодветно загревање, притисок и соодветно ладење на материјалот.



Слика 1: Ласерски процес на автоматско полагање на трака на кој што е прикажано типично ширење на ласерскиот зрак со визуелизација на предвиденото зрачење

Според ова, треба да ни биде јасно дека автоматското полагање на термопластичен препрег е температурно зависен процес.

При процес на автоматско полагање оптиката на ласерот мора да биде монтирана на главата, над рамнината на полагање за да обезбеди соодветно загревање на алатот. Последица на ова е тоа што геометријата на алатот и закривеноста на траката може да го блокираат зракот на ласерот пред материјалот да достигне во точката на допир – формирајќи таканаречени засенети реони. Според одредени истражувања ваквите региони предизвикуваат значително паѓање на температурата кое соодветно влијае врз квалитетот на врската помеѓу одделните слоеви.

3. ПРАКТИЧЕН ДЕЛ

Цел и подготовка на практичниот дел Целта на експериментот е постигнување на одредена контрола на температурниот процес при полагање со различни брзини на термопластичен композит со помош на ласер.

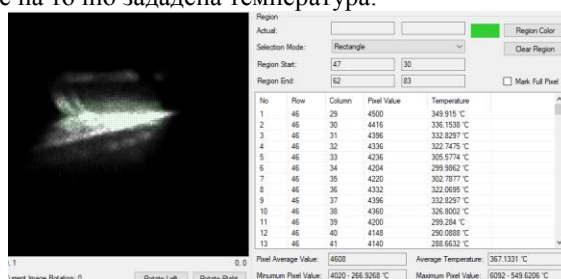
За реализација на експериментот избран е РЕКК: TenCate Cetex® TC1320 РЕКК Thermoplastic материјал. За реализација на експериментот се користи машина за автоматско полагање на препрег опремена со 3kW ласер достапна во Институтот за Современи Композити и Роботика во Прилеп.

Експериментот се состои во задавање на различни брзини на полагање и различен процент на искористеност на моќноста на ласерот при што се мери постигнатата температура. За да биде појасно каде се мери температурата на слика 3 е прикажана слика од термална камера при полагање на термопластичен композитен материјал. Зелениот правоаголник на сликата го означува реонот каде во случајот на нашиот експеримент е мерена температурата.



Слика 2: Машина за автоматско полагање на термопластичен препрег

Бидејќи квалитетот на композитниот дел зависи од начинот на градење на композитот со користење на полуготов материјал – препрег, температурата на која се изложува препрегот во рамките на производството на композитниот дел е исклучително важна. Целта на овој експеримент е контрола на моќноста зависно од брзината со цел постигнување на точно зададена температура.



Слика 3: Термална камера при полагање на термопластичен препрег во институтот за современи материјали и роботика – Прилеп

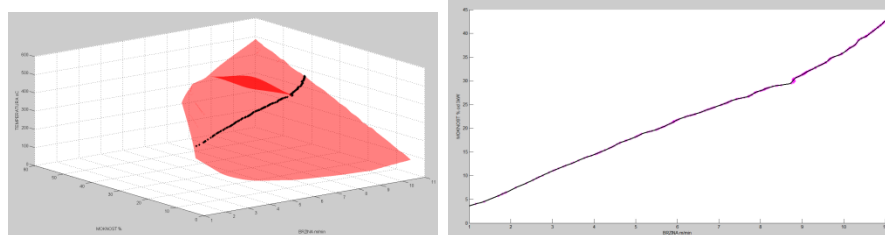
При дадениот експеримент добиени се следните резултати:

Брзина m/min	Моќност %	Температура °C	Брзина m/min	Моќност %	Температура °C	Брзина m/min	Моќност %	Температура °C
5	3	96	7	3	75	9	33	376
5	4	117	7	4	90	9	34	387
5	5	133	7	5	105	9	35	393.5
5	6	151	7	6	118.5	9	36	406.5
5	8	185	7	8	143	9	38	426
5	10	221	7	10	167.667	9	40	446.5
5	12	254	7	12	195	11	6	82
5	13	268	7	13	208.5	11	7	91
5	15	304	7	15	232	11	9	103
5	16	321	7	16	246	11	10	112
5	17	336	7	17	260.5	11	11	120
5	18	357	7	18	272	11	12	129
5	22	420	7	22	321.333	11	16	160
5	23	437	7	23	337	11	17	167
5	24	454	7	24	349.667	11	18	178
5	26	483	7	26	374	11	20	186

5	27	494	7	27	391.5	11	21	196
5	28	507	7	28	400.667	11	22	200
5	29	531	7	29	414.25	11	23	212
5	30	546	7	30	498.5	11	24	222
3	3	146	7	31	431	11	25	227.5
3	4	174	7	32	456.5	11	26	234
3	5	202	7	33	476	11	27	244
3	6	229	7	34	479	11	28	255
3	7	257	7	35	498.5	11	29	261
3	8	280	9	3	65	11	30	266
3	10	337	9	5	89	11	32	284
3	12	385	9	7	110.5	11	34	298
3	13	409	9	8	121.5	11	35	307
3	14	432	9	9	133	11	36	315
3	16	484	9	11	153	11	38	325.5
3	17	506	9	12	162.5	11	39	332
3	19	551	9	14	184.5	11	41	348
3	20	587	9	15	196.5	11	42	356
2	4	251	9	17	215	11	44	370
2	5	288	9	18	224	11	45	373
2	6	325	9	19	236	11	46	379
2	7	364	9	20	243.5	11	47	385
2	8	390	9	21	262	11	48	393
2	9	438	9	22	267.5	11	49	404
2	10	462	9	23	274.5	11	50	415
2	12	545	9	25	301.5	11	52	424
2	13	575	9	26	309.5	11	53	433
1	3	301	9	27	315.5	11	54	441
1	4	378	9	28	327	11	55	445.5
1	5	437	9	29	335.5	11	56	451
1	6	491	9	30	349.5	11	57	457
1	7	539	9	31	357.5	11	58	467.5
1	8	585	9	32	366	11	59	474

Поставување на математички модел согласно целта на практичниот дел Добиените резултати од точка 3.1. се искористени за развој на алгоритам во програмскиот пакет MATLAB така што е добиена функциска зависност меѓу моќноста, брзината и температурата.

Започнувајќи од трите измерени променливи (брзина, моќност и температура) најпрво се формира површина со користење на кубна 3D интерполација. Од добиената површина се одделуваат само точките (нумерички со дадена резолуција) кои го задоволуваат условот дека постигнале точно дадена температура (360oC во нашиот случај).

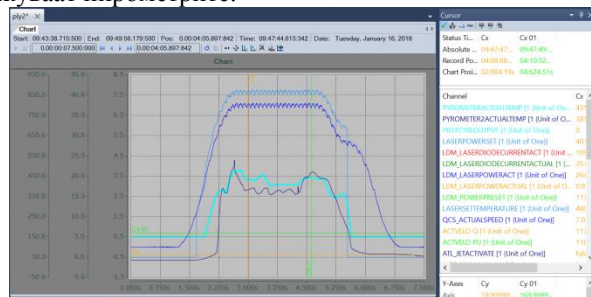


Слика 4: Лево: Приказ на резултатите од алгоритмот Десно: Зависност на брзината и моќноста за да се постигне температура од 360°C кај термопластичен PEEK препрег

Понатаму од овие точки, со spline кубна интерполација изведена е функциска зависност помеѓу брзината и моќноста со цел постигнување на зададената температура.

Алгоритмот нуди можност при која било зададена температура да се одреди функциска зависност меѓу брзината и моќноста, што значи дека доколку работиме со препрег со повисок степен на топење единствено што треба да се направи е да се внесе температурата на топење на препрегот. Како резултат ќе ја имаме функциската зависност за постигнување на таа температура при различни брзини.

Проверка и примена на алгоритмот: Добиената зависност меѓу моќноста и брзината, со цел постигнување на одредена температура е искористена за контрола на моќноста на ласерот во контролерот на машината за полагање на препрег. На следната слика е прикажана on line контрола на брзината (темно синиот график), моќноста на ласерот (светло синиот график) и мерената температура на два различни пирометри (останатите два графици). На сликата може да се забележи дека брзината и моќноста се однесуваат исто (со зголемување на брзината се зголемува и моќноста) додека температурата се движи во интервал од 350 до 420 степени. Разликата од 70 степени се должи на фактот што пирометрите се калибрирани врз црна површина, а при работа со ласерот имаме различни одблесози кои влијаат врз температурата што ја прикажуваат пирометрите.



Слика 5: On-line контрола на моќноста на ласерот во однос на температурата

4. ЗАКЛУЧОК

Процесот на автоматско полагање на препрег претставува остварлива технолошка за производство на термопластични композитни парчиња. Од предходно изложеното може да се заклучи дека изборот на оптимални процесни параметри игра голема улога како во квалитетот на композитот така и во брзината со која ќе се произведуваат вакви делови. Со оглед на фактот дека сакаме да се добие готов производ без дополнителна обработка процесните параметри како што е температурата игра значително голема улога.

Она што го прави овој процес уште посебичен за работа е зависноста на процесните параметри еден од друг. Имено поголема брзина значи и потреба од повеќе моќност за да се постигне посакуваната температура на топење, но ова истовремено го забрзува и процесот на ладење што од друга страна влијае на кристалноста на композитниот дел. Затоа при производство на термопластични композитни делови треба да се прави оптимизација помеѓу брзината на полагање (продуктивноста) и самите карактеристики на материјалот – зависно од намената на композитното парче може да се движиме кон поголема продуктивност но намален процент на кристализација – или обратно.

ЛИТЕРАТУРА

- Anahi Pereira da Costa, Edson Cocchieri Botelho, Michelle Leali Costa, Nilson Eiji Narita, Jose Ricardo Tarpani (2012). A Review of Welding Technologies for Thermoplastic Composites in Aerospace Applications
 C.M. Stokes-Griffin, P.Compston (2014). A combined optical-thermal model for near-infrared laser heating of thermoplastic composites in an automated tape placement process. *Elsevier*

- Dennis Maurer, Peter Mitschang (2015) Laser-powered tape placement process – simulation and optimization. *Advanced manufacturing: Polymer & Composites Science*
- Fazil O. Sonmez, H. Thomas Hahn (1997). Analysis of the ON-Line Consolidation Process in Thermoplastic Composite Tape Placement. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*
- Florian Henne, Stefan Heard, Andreas Kollmannsberger, Birte Hoeck, Markus G.R. Sause, Gunter Obermeier, Klaus Drechsler (2014) Thermoplastic In Situ Fiber Placement For Future Solid Rocket Motor Casings Manufacturing
- Gearoid Clancy, Daniel Peeters, Vincenzo Oliveri, Ronan O’Higgins, David Jones, Paul M. Weaver (2018) Steering of Carbon Fiber/Thermoplastic Pre-preg Tapes using Laser-Assigned Tape Placement, *School of Engineering and Bernal Institute, University of Limerick*
- Mattia Di Francesco, Laura Valdenz, Giuseppe Dell’Anno, Kevin Potter (2017) Heater power control for multi-material, variable speed Automated Fibre Placement. *Elsevier - composites, applied science and manufacturing*
- Daniel Peeters, Gearoid Clancy, Vincenzo Oliveri, Ronan O’Higgins, David Jones, Paul M. Weaver (2018) Thermoplastic Composite Stiffener Design with Manufacturing Considerations. *School of Engineering and Bernal Institute, University of Limerick*
- Sara Black (2016) Thermoplastic wings on the horizon. *Thermoplastic Composite Wing, Composite World*
- Tauseef Aized, Bijan Shirinzadeh (2010) Robotic fiber placement process analysis and optimization using response surface method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*
- <https://mikrosam.com/new/article/en/automated-fiber-placement-the-complete-system/>