

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство
Ниво студија: Мастер академске студије
Модул: Примењена механика и аутоматско управљање
Предмет: Механика континуума
Број индекса: 333/2015

Јулијана М. Лабовић

Композитни материјали, карактеристике и примена

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Гордана Богдановић - ментор
2. _____
3. _____

Датум
одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да:

Проучи литературу која се тиче композитних материјала, у смислу избора конституената, начина фабрикације и осталих општих карактеристика ових материјала. Такође се очекује да у оквиру овог рада буде проучен и модел формирања ламина, начин слагања, као и избор праваца влакна у оквиру различитих слојева. Потребно је да проучи литературу која се односи на микромеханику ламината, као и основне теорије отказа. Очекује се од кандидаткиње да у закључним разматрањима прикаже и новију генерацију материјала која такође спада у композитне материјале.

Препоручена литература:

- [1] Д. Адамовић, М. Јовановић, В. Лазић, Н. Ратковић (2003): Машински материјали, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац
- [2] Akovali, G.(2001): Handbook of Composite Fabrication, RAPRA Technology LTD.,Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, UK
- [3] F.Hussain, M. Hojjati, M. Okamoto, R. Gorga (2006): Polymermatrix: Prcesing, Manufacturing and Application, Review Papers

Крагујевац, 2019

Ментор:
Др Гордана Богдановић,
ванредни професор

Увод

1. Увод.....	5
2. Структура композитних материјала.....	6
3 Композитни материјали са полимерном матрицом (<i>PMC</i>).....	7
3.1 Матрице	9
3.1.1 Дуромерни композити	12
3.1.2 Пластомерни (еластомерни) композити	14
3.2 Влакна	15
3.2.1 Материјали влакана	17
3.2.2 Форме влакана.....	23
4. Поступак производње полимерних композита	31
5. Композитни материјали са металном матрицом (<i>MMC</i>).....	37
5.1 Поступци производње	38
5.2 Композити са алуминијумском матрицом.....	39
5.3 Композити са магнезијумовом матрицом.....	41
5.4 Композити са титанијумском матрицом.....	41
5.5 Композити са бакарном матрицом	41
5.6 Композити са матрицом од суперлегура	42
6. Композити са керамичком матрицом (<i>CMC-Ceramic Matrix Composite</i>)	43
6.1 Композити са матрицом од силицијум-карбида	44
6.2 Композити са матрицом од алуминијум-оксида.....	45
7. Ламинирани (слојевити) композитни материјали.	47
7.1 Слојевити <i>Glare</i> (GLAss - REinforced fibre metal laminate), композити.	47
7.2 Сендвич конструкције	49
8. Механика композитних материјала	51
8.1 Тензор еластичности за различите материјале.	51
8.1 Микромеханика композитних материјала.....	53
8.1.1 Правило мешавина.....	53
8.1.2 Halpin-Tsai једначина.....	54
8.2 Основе макромеханике композитних материјала.....	55
8.2.1 Анализа слојевитих композита – дефинисање сила и момената.....	56
8.3 Критеријуми попуштања композитних материјала.....	57
8.3.1 <i>Tsai-Hill</i> критеријум попуштања	58
8.3.2 <i>Tsai-Wu</i> критеријум попуштања	58
8.3.3 <i>Hashin-ov</i> критеријум попуштања	59

10. Закључак	60
11. Референце	61

Резиме:

Композитни материјали чине посебну групу материјала који се добијају спајањем две или више компоненти различитим технолошким процесеима. Физичка структура било ког композитног материјала се грубо може поделити на две основне компоненте које чине матрицу и ојачање. Матрица је знатно еластичнија у односу на влакна која по правилу поседују својства веће затезне чврстоће у односу на матрицу. Материјал, сам по себи, задржава својства обе компоненте, чиме се гради здружени материјал који поприма физичке, механичке и друге особине карактеристичне за материјале матрице и влакана. На тај начин се добија материјал побољшаних карактеристика у односу на већину материјала који се користе у индустрији.

Кључне речи: *композитни материјали, материјали ојачани влакнима, полимерни композити, керамички композити, метални композити.*

Abstract:

Composite materials are a special group of materials that are obtained by merging two or more components with different technological processes. The physical structure of any composite material can be roughly divided into two basic components: matrix and reinforcement. The matrix is much more elastic than the fibers which, as a rule, possess the properties of higher tensile strength compared to the matrix. The material, in itself, retains the properties of both components, which builds a combined material who has the physical, mechanical and other properties of matrix and fiber materials. In this way, the material of the improved characteristics is obtained in relation to most of the materials used in the industry.

Key words: *composite materials, fiber reinforced materials, MMC – Metal Matrix Composites, CMC-Ceramic Matrix Composite, PMC-Polymer Matrix Composite.*

1. Увод

Композитни материјали су заступљеним у различитим гранама индустрије. Неки од првих материјала који се могу назвати композитним, потичу још из времена када су се куће градиле од материјала као што су блато и пруже. Блато је служило као везивни материјал који је још уз то обезбеђивао топлотну изолацију, док је пруже осигуравало неопходну еластичност овом градивном материјалу, с обзиром да је блато након сушења постајало крто и тиме сегубила његова чврстоћа. И ако је овај материјал био подесан за неке видове градње, прешло се на много чвршће материјале који су човеку омогућили градњу много чвршћих структура. Такав материјал је дуги низ у употреби и познат је као бетон, код кога је блато (чији је састав неконтролисан с обзиром да садржи нечистоће), замењен материјалима као што је песак, цемент и вода, који се у зависности од односа ове мешавине могу контролисати, па се тиме контролишу и његове механичке особине. Додавањем челичне арматуре, које чине шипкасти материјали различитог пречника добија се материјал високе носивости, који се састоји од две основне компоненте: малтера одређених карактеристика и челика не гарантованог квалитета, али довољног за употребу у грађевинарству. Ово су неки од најранијих примера примене композитних материјала које је човек успео да искористи, па одатле потиче и сам назив оваквих материјала који потиче од латинске речи *Compositum* што значи састављено.

Велики број техничких решења захтевају карактеристике какве немају самостални метали па ни њихове легуре. Исто правило важи како за полимерне тако и за керамичке материјале. Због тога се све више у употреби користе комбинације два или више материјала који се заједничким термином називају композитни материјали, без обзира на њихову структуру, механичке, динамичке и друге особине. Захтеве за оваквим материјалима се најчешће могу срести у аерокосмонаутици, бродоградњи, аутомобилској индустрији, војном инжењерству итд. Ипак, израда ових материјала није заступљена у широкој примени, где се могу користити други материјали који би смањили трошкове израде, па се композитни материјали у широкој примени користе само код производа чија намена изричито захтева употребу ових материјала, и само тада је њихова примена економски оправдана, као што је то случај у цивилном и војном ваздухопловству, бродоградњи, једним делом у аутомобилској индустрији и друго.

Један од примера коришћења композитних материјала се може срести код компоненти авионског мотора које треба да буду релативно мале густине и масе, високе чврстоће и крутости, отпорности на корозију, абразију и у случају млазних мотора отпорност на високе температуре.

У овом раду биће разматрана употреба композитних материјала, њихова механичка својства нарочито код влакнима ојачаних композита. Осим тога, у овом раду ће се обухватити комплетна теорија самих композитних материјала, њихове врсте и својства, начин производње па и сама примена у индустрији уз посебан акценат на полимерне композитне материјале ојачане влакнима, какви се најчешће срећу у ваздухопловној и аутомобилској индустрији.

2. Структура композитних материјала

Композитни материјали чине мешавину два или више материјала са различитим физичким и механичким особинама у микроскопској или макроскопској размери. Материјали добијени на овај начин показују најбоља својства компонената које материјал поседује, а у неким случајевима долазе до изражаја и оне особине које самосталне компоненте не поседују (Д. Адамовић, 2003).

Композитни материјали се могу поделити према врсти матрица на (Д. Адамовић, 2003):

- Метални композити (MMC – Metal Matrix Composites) – који су у основи материјали добијени различитим процесима синтезе, различитих металних легура.
- Керамички композити (CMC – Ceramic Matrix Composite) – су композити ојачани влакнима, који се добијају поступком сагоревања органских материјала након чега долази до ставрања угљеничне матрице која се образује око влакана.
- Полимерни композити (PMC – Polymer Matrix Composite) – представљају групу композитних материјала који су такође ојачани влакнима. Ови материјали се даље могу поделити на *пластомере* и *дуромере* у зависности од сировинског састава.

Према облику ојачања они се могу поделити у три категорије које чине (Д. Адамовић, 2003):

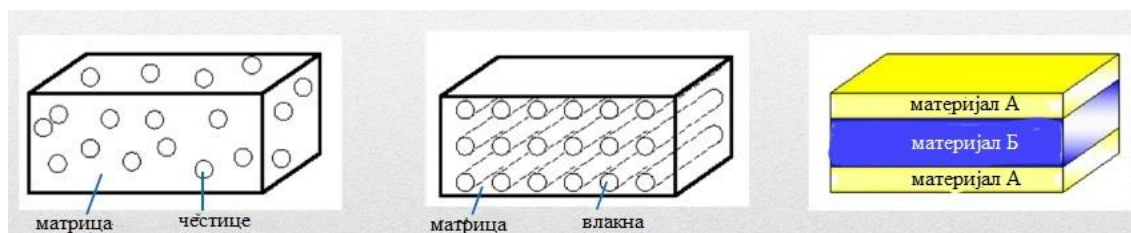
- честицама ојачани;
- влакнима ојачани и
- слојевити одн. ламинрани композитни материјали.

Композитни материјали се састоје од два основне компоненте **матрице** и **ојачања**, од којих у великој мери зависе механичке особине материјала. У широј примени, нарочито код полимерних материјала, као ојачање унутар полимерне матрице користе се влакна као што су: стаклена, угљенична и арамидна (кевлар). За разлику од полимерних матрица, код металних композита матрицу чини најчешће легура неког метала, док се за ојачање користе влакна, која могу бити:

- Континуирана, обично су од материјала као што су: силицијум карбид (SiC), бор, алуминијум оксид (Al_2O_3), као и других метала које карактерише висока такчка топљења.
- Дисконтинуирана ојачања влакнима (сецкано влакно или честице), користе се такође поменути материјали, али се њима могу придодати и једињења као што је титаниум диборид (TiB_2), који је у основи керамика високе тврдоће, или сецкана влакна угљеника.

Дакле, из приложеног се може закључити да су матрице композитних материјала углавном раствори, било да се ради о течним растворима као што је то случај са полимерним матрицама, или метални раствори код металних

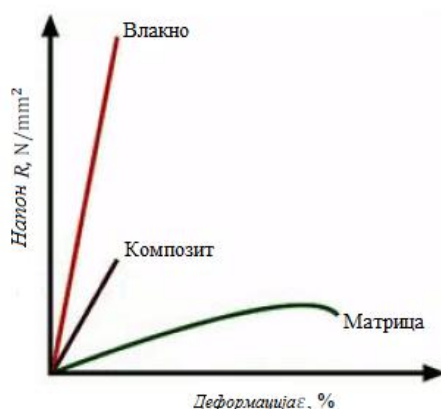
композита, а да ојачања представљају материјали који се додају поменутих матрицама, и могу бити различитих облика, структуре или ткања одн. плетива као што је то случај са полимерним композитним материјалима. Одабир материјала матрице и ојачања првенствено зависи од намене композитног материјала, па се сходно томе врши и одабир одговарајућег облика и структуре ојачања, првенствено због тога што технологија израде композитних материјала варира у зависности врсте композитних материјала. Овоме треба додати и слојевите одн. ламиниране композитне материјале које структурално чине слојеви различитих материјала. На слици 1 приказане су основне разлике у структури композитних материјала.



Слика 1. Упростићен приказ разлика у структури композитних материјала

3 Композитни материјали са полимерном матрицом (РМС)

Комозитни материјали код којих се ојачање састоји од влакана, долазе до изражаја механичке особине као што су побољшање чврстоће, жилавост материјала, крутост, као и повећања односа између чврстине и густине због уградње чврстих, крутих и кртих валакана у мекшу дуктилнију матрицу. **Дуктилност** представља способност материјала да се под утицајем напрезања пластично деформише одн. истеже пре него што дође до лома материјала. Границе еластичности у случају композитних материјала ојачаних влакнима се могу приказати дијаграмом приказаним на слици 2 (Akvali, 2001).



Слика 2. Хипотетички дијаграм дуктилности композитних материјала

Код овог типа композитних материјала ефикасност ојачања је већа у односу на друге композите, јер материјал од кога је израђена матрица преноси оптерећења на влакна, која су крта, па се на тај начин осигурава жилавост.

Овакви композити могу бити *изотропни* (што значи да су механичке особине једнаке у свим правцима), *ортотропни* (код којих су механичка својства различита према различитим ортогоналним смеровима), или *анизотропни* (код којих механичка својства варирају у зависности одправаца).

Ојачања код композитних материјала ојачаним влакнима су најчешће у облику кратких влакана тзв вискера, који чини монокристално влакно пречника од 0,5 до 30 μm и дужине до 20 mm, изузетно високе чврстоће која је чак и до десет пута чвршћа од челичних нити истог пречника, са тачком топљења између 2000°C и 4000 °C. Вискер се најчешће израђују од: угљеника, силицијум -карбида, силицијум -нитрида и алумуинијум -оксида

И ако вискере одликује висока чврстоћа, они нису заступљени у већој мери из економских разлога. Првенствено због саме цене овиих материјала, а затим и због сложенијег технолошког поступка уградње вискера у матрицу.

Осим њих, као ојачање користе се и влакна која су релативно равномерно распоређена управцу уздужног пресека материјала и најчешће се користи у облику ткања. Влакна су аморфна или поликристална па имају мали пречник. Овакви материјали су полимерни или керамички као што су: стакло, угљеник, бор, арамид итд.

Жичано ојачање се састоји од жица које су релативно већег пречника у односу на влакна, и обично су од материјала као што су: челик, волфрам и молибден. Жице као ојачање често се користе код израде кућишта ракета при чему се намотавањем добија кошуљица која се уграђује у матрицу. Овакво ојачање користи се и код израде аутомобилских гума, где се челичним жицама радијално распоређеним постиже ојачање пнеуматика. Жице се користе и код израде прева високог притиска.

Код полимерних композита матрице су најчешће полимерне и углавном су у облику полимерних смола, које су велике молекуларне масе које је потребно ојачати влакнима. У зависности од врсте полимерних смола и различитих влакана који се употребљавају као ојачање, добија се широк спектар полимерних композитних материјала ојачаних влакнима, са различитиммеханичким особинама. Приликом добијања ових материјала треба узети у обзир чињенице као што су (Аkovali, 2001):

- намена материјала – од чега зависе механичке и друге особине материјала који ће се употребити у одређене сврхе.
- економска оправданост – коју такође треба узети у обзир, јер поједини композитни материјаликао и начин њихове израде могу превазилазити у смислу трошкова, стварне потребе материјала. Према томе је економски неоправдано користити одређену врсту композитних материјала ако нема стварне потребе за механичким и другим особинама које тај материјал поседује. У том случају треба извршити одабир материјала који ће задовољити потребе производа без излагања непотребним трошковима.

Полимерни комозити израђују се, као што је већ речено, у најширем могућем спектру, и карактерише их велика разноликост, ако се узме у обзир примена, механичка и друга својства, начин производње и цена.

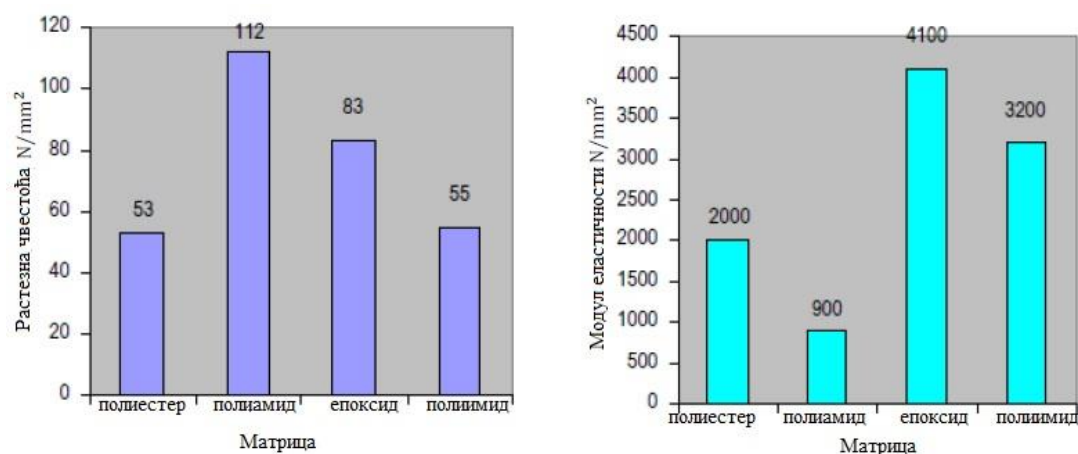
3.1 Матрице

Матрице морају бити знатно жилавије и дуктилније у односу на влакна, како би преносили оптерећење на ојачање, а са друге стране спречиле да дође до ширења пукотина у влакнима која се јављају услед оптерећења, која би у случају да матрица није довољно жилава довело до тога да се пукотине шире кроз читав композит. Са друге стране, матрица мора бити довољно чврста како би допринела укупној чврстоћи композита (F.Hussain, 2006).

Полимерне матрице се могу примењивати у температурном опсегу од 80 до 315°C у зависности да ли се за израду матрице композита користе незазињене полиестерске смоле или полиамидне. Према понашању на одређеним температурама, матрице се могу поделити на (F.Hussain, 2006):

- пластомерне - код којих долази до промена услед деловања повишене температуре и,
- дуромерне - код којих не долази до промена услед деловања повишене температуре.

Дуромерне матрице се начешће производе од епоксидне смоле, па овакви материјали задржавају своје особине на температурама до 315°C, имају боље механичке особине, али су зато доста скупље у односу на пластомерне матрице па се употребљавају само код производа код којих су таква својства неопходна. На слици 3. графички су приказане разлике у механичким својствима код различитих врста матрица, што зависи од материјала матрице.



Слика 3. Графички приказ затезне чврстоће и модула еластичности

Развојем технологије временом су се развиле и пластомерне матрице које су отпорне на високе температуре као што су полиимидне матрице које подnose температуру до 300 °C. Постоје и друге пластомерне матрице које задржавају своје особине на високим температурама, и имају потенцијала за примену свугде где се користе епоксидне смоле које су још увек доста заступљене нарочито у ваздухопловству.

Матрица композитних материјала мора да задовољава следеће услове (F.Hussain, 2006):

- да везује влакна и да на њих преноси оптерећење, при чему мора да задржи постојећи облик, дуктилност, и друга механичка и температурна својства;
- мора бити довољно чврста како би допринела укупној чврстоћи материјала;
- мора бити способна да изолује појединачна влакна код којих је дошло до пуцања услед оптерећења, и да на тај начин спречи ширење пукотина кроз остале делове материјала;
- мора да осигурава добар квалитет површине коме није поробна додатна обрада у смислу брушења. На тај начин добијају се делови у коначном облику или блиски коначном облику;
- мора да формира облик композитне конструкције;
- мора да осигурава заштиту влакана од хемијских, услова спољашње средине као што су: влажност ваздуха, нагле промене спољашње температуре итд, механичких утицаја од оштећења и
- мора да повећа жилавост композитног материјала у целини.

Механичка својства материјала од којих се израђују матрице приказана су у табели 1.

Табела 1. Механичка својства материјала матрице

<i>Tip matrice</i>	ρ [kg/m ³]	E [GPa]	G [GPa]	R_m [MPa]	ε [%]	α [10 ⁻⁶ /°C]	T_g [°C]
Poliester	1500	4,5	2	90	5	200	110
Vinil ester	1150	4	-	90	5	53	150
Епокси	1400	6	2,2	130	8,5	70	250
Bizmaleimid	1320	3,6	1,8	78	6,6	49	300
Poliimid	1890	4,9	-	120	3	90	320
Poliester imid	1270	3	-	105	60	62	217
Poliamid imid	1400	5	-	95-185	12-18	36	240-270
PPS	1340	3,3	-	70-75	3	54-110	85
PEEK	1320	-	-	92-100	150	-	143
Polisulfon (PS)	1240	2,5	-	70-75	50-100	56-100	190
Polipropilen (PP)	900	1-1,4	-	25-38	300	110	-20 - -5
Polikarbonat (PC)	1200	2,4	-	45-70	50-100	70	133
Aluminij	2700	70	-	200	-	-	-
Ti – 6Al – 4V	4500	110	-	1000	-	-	-
borosilikatno staklo	2300	60	-	100	-	3,5	-
MgO	3600	210-300	-	97-130	-	13,8	-
Al ₂ O ₃	4000	360-400	-	250-300	-	8,5	-
SiC	3200	400-440	-	310	-	4,8	-

Особине материјала матрице су од велико значаја за одређивање уздужне отпорности на притисак, попречне затезне чврстоће и отпорност на смицање између слојева. Све наведене особине су условљене у великој мери особинама које поседује материјал од кога је израђена нека матрица.

У случају авионских конструкција матрица мора бити отпорна и на погонско гориво, хидрауличне течности и друге хемикалије које се користе при одржавању авиона. У овом случају, композитни материјали морају да поднесу температуру и до 200 °C.

Као што је већ речено, особине матрице у великој мери одређују особине композитног материјала, па се зато морају узети у обзир и ограничења која поједини материјали имају. Према томе, осим наведених фактора морају се узети у обзир и унапред очекивани утицај околине, јер је матрица као таква, прва изложена својом површином утицајима као што су влага или различите хемикалије. То је важно пре свега због тога што се композитни материјали ојачани влакнима могу произвести са одговарајућим механичким својствима али различитим особинама када се ради о спољним утицајима који нису механичке природе. Једно од физичких својства које није механичке природе је и температура преласка из течног у чврсто стање. Матрица је вискозна у течном облику, али се приликом стврдњавања ослобађа температура (*GGT-GlassTransitionTemperature*) коју треба узети у обзир јер она у великој мери одређује коначне особине матрице. При употреби изнад *GGT* механичке особине матрице се знатно мењају. Влага у композитном материјалу снижава температуру преласка материјала у круто стање што продужава време стврдњавања, али такође утиче на механичке особине матрице (Д. Ћорић 2010).

У случају дуромера при загревању долази до повратне хемијске реакције приликом које материјали који се користе у изради матрице реагују међусобно тако да се стварају почетни реактанти. Овај процес траје све док се не успостави хемијска равнотежа. Када се ова равнотежа успостави матрица прелази у чврсто стање. Овакве хемијске реакције су иреверзибилног карактера, при чему се формирају хемијске везе између ланаца полимера који задржавају агрегатно стање све док је она у декларисаним границама. Када се температура прекорачи долази до разградње хемијских веза. Због тога се дуромери у процесу рециклаже могу само механички уситњавати али не и омекшавати излагањем високим температурама, па према томе није могуће њихово поновно обликовања.

У односу на дуromере, пластомери омекшавају приликом поновног загревања па је могуће накнадно обликовање материјала, који хлађењем задржава облик, што олакшава репарацију делова од композитних материјала који припадају групи пластомера. За разлику од дуromера који су аморфни, пластомери кристалишу до одређене границе. Ова особина пластомера да кристалише узтокована је смеровима ланаца, што је од посебног значаја јер материјали који стварају кристалну структуру имају већу густину, па самим тим и боља механичка својства и отпорност на растрварање.

3.1.1 Дуромерни композити

Полимерни композити који припадају групи дуromера се најчешће користе у производњи композита, јер је цена њихове израдерелативнониска, вискозност је нижа у односу на пластомере, па због тога дуromерне матрице боље везују влакна, одн. боље их натапају услед знатно мање силе трења која се јавља у самом флуиду. У случајевима када су потребна боља механичка својства (као што је то случај у авиоиндустрији), најчешће се користе дуromерне матрице добијене од епокси смола због релативно једноставног коришћења, ниске цене и одличних механичких особина, као и велике отпорности на влагу и агресивне хемикалије. Осим тога, овакви дуromери имају високу адхезију па се могу користити у комбинацији са већином влакана, што је још једна предност епоксдних смола код израде дуromерних матрица.

Епоксидне смоле су углавном двокомпонентне и састоје се из смоле и катализатора који потпомаже реакцију учвршћивања. Мешањем ове две компоненте долази до хемијске реакције која ослобађа температуру, а резултат реакције је чврста, али крта дуromерна матрица. Како би се смањила кртост и повећала дуктилноост матрице, а са друге стране очувала друга механичка својства, овим смешама додају се једним делом компоненте као што су еластомери или неке друге врсте полимера.

Код изразито повишених температура уместо епоксидних смола користе се полиимиди, од којих су најчешће у употреби бизмалеимиди који поседују добре производне карактеристике, али им је главни недостатак повећана кртост, која се може смањити додавањем компоненти као што су полисулфон, полиетеримид и сл. У употреби су и друге врсте мешавина од којих се граде дуromерне матрице, као што су: PMR-15 полиимид који је постојан на температури од 300°C, цијанати који подносе температуру до 290°C, итд. Често се користе и незасићени полиестери као што је винил естер, који је доста јефтинији у односу на остале дуromере, постојан је на влагу и једноставан за коришћење (CW CompositesWorld 2019).

Епоксидне смоле припадају групи аморфних полимера што конкретно значи да матрице на бази епоксидних смола на температурама вишим од декларисаних постају релативно гумасте, а на нижим стакласте. Хемијске реакције у току полимеризације епоксидних смола су егзотермне, па употреба учвршћивача у великим количинама може довести до топлотне деградације матрице, која даље може довести до губитка циљних механичких својствасамог композита.

Како би се промениле неке од механичких особина, епоксидима се могу додавати и друге компоненте које смањују вискозитет у току обраде, повећања подручја лома чиме се снижава еластичност итд.

Из приложеног се види да је основна предност епоксида могућност да се утиче на његове механичке особине додавањем појединих компоненти. На тај начин могу се добити дуromерне матрице које одговарају унапред предвиђенимспецификацијама. Поред тога епоксидни композити имају и одређене недостатке као што су: висока цена компоненти, већа осетљивост на влагу у односу на друге врсте дуromера, као и осетљивост на органске киселине и феноле.

Полиестерске смоле се такође употребљавају у изради дуromерних матрица, а процес производње је сличан производњи епоксидних дуromера, при чему се незасићени полиестери комбинују са катализаторима при чему долази

до егзотермне реакције. Приликом израде, дуromери израђени од полиестерских смола у току процеса полимеризације пролазе кроз различите фазе почевши од течне преко гумасте и на крају чврсте. Основне предности полиестера су ниска почетна вискозност, једноставна производња која је при томе знатно јефтинија у односу на дуromере на бази епоксидних смола. Од недостатака се морају узети у обзир да процес полимеризације код полиестерских дуromера изазива заостала напрезања у материјалу која доводе до кртости матрице, која је уз то изразито слабе отпорности према алкалним једињењима.

Винил естери су према својим карактеристикама између епоксида и полиестера. Полимеризација се одвија према релативно ниским температурама слично као код полиестера, али се за разлику од њих добијају боље механичке особине и боље везе између влакана и матрице. Винил-естери су доста скупљи од полиестера, али имају већу чврстоћу у односу на епоксидне дуromере (CW CompositesWorld 2019).

Фенолне смоле такође припадају групи дуromера и настају полимеризацијом фенола додавањем формалдехида у посебним условима. Карактерише их добра подношљивост високих температура, при чему долази до сагоревања површинских слојева који угљенише, што је и највећа предност у односу на остале дуromере. Недостатак ових дуromера су комплексни процеси производње јер се полимеризација фенолних смола одвија под високим притиском, а готов материјал садржи доста шупљина које смањују његове механичке особине.

Бизмалеимиди су врста дуromера који поседују добре производне карактеристике и отпорни су на релативно високе температуре у односу на друге дуromере. Главни недостатак им је кртост која се може смањити додавањем различитих адитива. По структури су слични епоксидима, али у односу на њих могу имати нижу вискозност што омогућава боље пријањање влакана. Добро подносе температуру па је максимална температура до које се ови материјали могу излагати износи 150 °C што их чини подесним за коришћење у изради суперсоничних авиона. Недостатак бизмалеимида је висока цена израде у односу на епоксидне смоле.

Полиимидне смоле користе се за израду матрица код композита који су изложени изразито високим температурама у опсегу између 200 °C и 400 °C. Производња ових материјала је врло компликована и захтева услове као што су висока температура и висок притисак, као и праћење процеса производње који морају бити у строго контролисаним условима јер је могуће стварање експлозивних материја.

Дуromери на бази полиимидне смоле се најчешће користе за изарду оплата млазних мотора пре свега због способности да поднесу високе температуре од преко 370 °C при чему задржавају своје механичке карактеристике и квалитет, али је процес производње релативно сложен па самим тим и скуп.

Цианатне смоле (*cyanate ester resin CE*), користе се за израду матрица отпорних на високе температуре док се полимеризација помоћу учвршћивача одвија на температурама између 170 и 250 °C. Основне механичке особине оваквих матрица су тврдоћа при већим температурама као и добра затезна чврстоћа. Матрице израђене од цианатне смоле су отпорне на влагу, али дугим излагањем влази ова особина се постепено губи па се цианатне смоле често користе у комбинацији са другим смолама као што су то епоксидне, како би се на тај начин побољшало својство материјала (*Advanced Composites Group Ltd*).

Композит произведен на бази цианитне смоле са побољшаним механичким и температурним особинама под називом НТМ143 предвиђен је за употребу код вештачких сателита (CWcompositeWorld 2009).

3.1.2 Пластомерни (еластомерни) композити

Пластомери су најчешће аморфни, са неправилним распоредом молекула, али сви имају тенденцију ка кристалој структури одн. правилним распоредом молекула. Пластомери који имају кристалу структуру су отпорнији на хемијске раствараче и утицаје горива у односу на аморфне, код којих постоји велика испреплетаност полимерних ланаца који се приликом загревања кидају. За разлику од кристалних пластомера, аморфни су подложни утицају растварача, па самим тим остепљиви на трење и замор.

Битна карактеристика пластомера је и већа отпорност на влагу и мања осетљивост на ударна оштећења у односу на дуромере. Пластомери се након загревања на одређеној температури могу поправљати или заваривати. Међутим, температура и притисак на коме се одвија полимеризација су доста већи у односу на дуромере.

Кристалност пластомера настаје као последица мање или веће усмерености полимерних ланаца, и ако потпуну кристализацију није могуће постићи. Може се рећи да су пластомери семикристални јер садрже и кристалну и аморфну фазу. Брзина хлађења и производни услови утичу на кристализацију ових полимера. Већа брзина хлађења доводи до аморфне структуре полимера, јер је за кристализацију потребно више времена.

Поликетони су група пластомера која је ближа кристалој структури, и као таква је отпорна на веће температуре. Овој групи припадају поли(етер-кетон *PEK*), поли(етер-кетон-кетон *PEKK*) и најчешће коришћени поли(етер-етер-кетон *PEEK*), код кога је ниво кристалности до 40%, поседује добре механичке особине и отпоран је на већину хемијских растварача. Недостатак овог пластомера је висока цена производње (Gardiner, 2018).

Поли(фенилен-сулфид *PPS*) је полимер високе кристаласте структуре са одличном отпорношћу на високе температуре и практично је незапаљив. Често се користи за ентеријере путничких авиона у цивилном ваздухопловству. Задржава своје механичке особине на температурама до 200 °С након чега долази до губитка ових карактеристика.

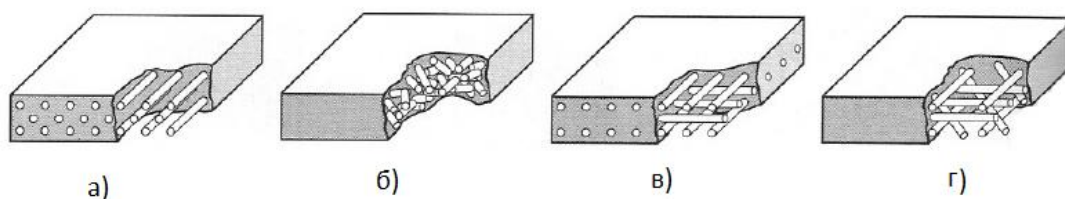
Полимери на бази деривата сулфона као што су: полисулфон (*PSU*), полиетер-сулфон (*PESU*), и полиарил-сулфон (*PAS*) припадају групи аморфних полимера који су отпорни на већину хемијских растварача, имају добре механичке особине, као и отпорност на влагу и повишену температуру (Gardiner, 2018).

3.2 Влакна

Влакна су саставни део полимерних композитних материјала и осим што доприносе чврстоћи материјала имају и ту функцију да пренесу оптерећење које делује на матрицу. Могу се дефинисати као материјали код којих је дужина много већа од пречника, под условом да је пречник мањи од једног милиметра.

Ако се узме у обзир да се повећањем преноса оптерећења са матрице на влакна повећава и чврстоћа композита, додавањем влакана изузетно малог пречника може се постићи врло висока чврстоћа композита у односу на укупан волумен материјала. Влакна која се користе као ојачање матрице имају високу тачку топљења. Осим тога, влакна као носиоц оптерећења морају бити што је могуће чвршћа при чему је важно да буду мале масе. Због тога се за израду влакана користе материјали високе специфичне чврстоће и високе крутости према специфичном модулу еластичности.

Највећи модул еластичности имају материјали малог атомског броја, као и они који имају ковалентне везе као што су угљеник и бор. На слици 4 графички су приказани различити начини распореда влакана унутар матрице.

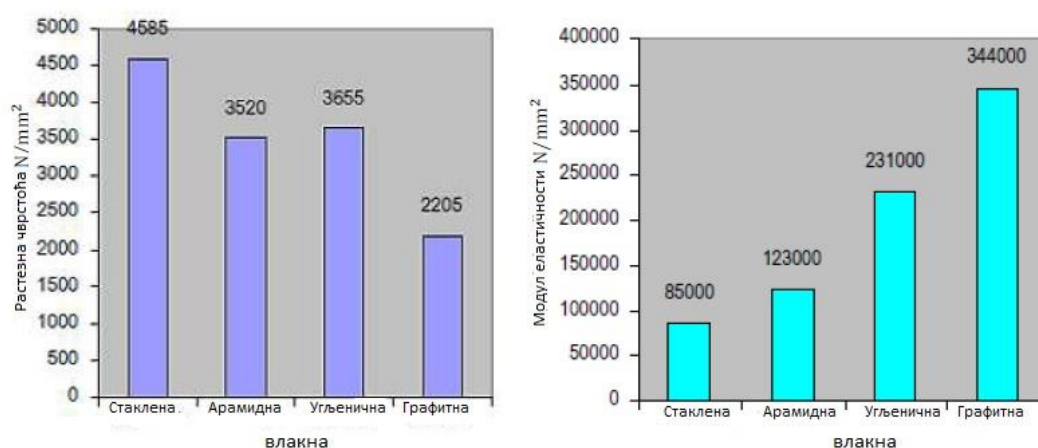


Слика 4. Начини распореда влакана: а) континуирана једносмерна влакна, б) насумично распоређена дисконтинуирана влакна, в) ортогонално распоређена, д) влакна распоређена у више праваца

Код континуирано усмерених влакана особине композитног материјала су веома неједнаке. Другим речима, чврстина материјала у смеру влакана је висока, а управно на њих је знатно нижа, што значи да једносмерна влакна задржавају своје механичке особине уколико је оптерећење паралелно са влакнима (Д. Ћорић 2010).

Основна сврха влакана је да пренесе оптерећење нарочито код композитних материјала који се користе у конструкцији и тада је потребно да влакна поднесу оптерећења и до 90% од укупног оптерећења коме је изложен материјал, при чему влакна морају обезбедити крутост и стабилност на повишеним температурама. У неким случајевима у зависности од намене композитног материјала, они могу бити електропроводљиви или изолациони.

На слици 5. дат је упоредни приказ затезне чврстоће и модула еластичности различитих врста влакана.



Слика 5. Модул еластичности и затезначврстоћа влакана (Д. Ђорић 2010)

У материјалима малог атомског броја и ниске густине јављају међусобне силе које као резултат имају материјале високих механичких особина, као што су: угљеник, силицијум итд. Влакна која се користе за ојачање композитних материјала обично се израђују од таквих елемената или њихових једињења. Како су ови материјали по природи крти, код њих првенствено долази до лома насупрот материјалима који се пластично деформишу, као што су метали. Лом влакана настаје као последица микропукотина које се шире кроз влакна. Из тог разлога се користе влакна малог волумена по метру дужном, јер је вероватноћа појаве пукотине обрнуто пропорционална волумену материјала. Осим тога, код оваквих материјала је нарочито изражено одступање механичких особина од задатих вредности, што додатно компликује прорачун и израду структура од композитних материјала. Због тога је од велике важности уједначеност квалитета влакана, која се може постићи употребом сировина високе чистоће или заштитном превлаком влакана. Овде је брзина таложења молекула која зависи од брзине хлађења, од посебног значаја за квалитет влакана, јер се наглим хлађењем влакана добија фина молекуларна структура, која се иначе не би могла постићи код материјала која немају физичку форму влакана. Поступци добијања влакана, при чему се они најчешће добијају извлачењем због затезних напрезања, која се јављају унутар влакана имају утицај на усмереност кристала (Аковали, 2011)

У табели 2 приказани су различити типови влакана и њихове механичке особине, које су одређене следећим величинама: d - пречник влакна, ρ - густина, E - модул еластичности, R_m - затезна чврстоћа, ε - проценат деформисања, $\alpha_1 \alpha_2$ - коефицијент линеарног топлотног истезања.

Табела 2. Механичке особине влакана према материјалу (Д. Ћорић 2010)

Tip vlakna	d [μm]	ρ [kg/m^3]	E [GPa]	R_m [GPa]	ϵ [%]	α_1 [$10^{-6}/^\circ\text{C}$]	α_2 [$10^{-6}/^\circ\text{C}$]
PAN – IM	9	1800	276	2,93	1,0	-0,5	12
PAN – HM	10	1900	400	2,9	0,5	-1,2	12
PAN – UHM	10	1860	517	1,72	0,4	-1,0	-
Pitch	11	2020	345	1,72	0,9	-1,6	7,8
Rayon	6,5	1660	41-393	0,62-2,2	2,5	-	-
E – staklo	14	2540	72,4	3,45	3,2	5,0	5,0
C – staklo	-	2490	69	3,16	4,8	7,2	7,2
S – staklo	10	2490	85,5	4,59	5,7	5,6	5,6
Kevlar-29	12	1440	62	2,76	4	-2	59
Kevlar-49	12	1479	131	3,79	2,8	-2	59
Polietilen	38	970	117	2,58	5	-	-
Čelik s 0,9 % C	100	7800	210	4,25	-	11,8	-
Berilij	-	1850	300	1,26	-	11,6	-
Volfram	25	19300	360	3,85	-	4,5	-
SiC	100-200	3300	430	3,5	-	5,7	-
Al ₂ O ₃	20	3950	379	1,4	-	7,5	-
Bor	100-200	2600	385	3,8	-	8,3	-

Код израде композитних материјала ојачаних влакнима, као ојачање употребљавају се влакна од различитих материјала, док се код полимерних композита ојачање најчешће израђује од стаклених, угљеничних или арамидних влакана познатих као кевлар. Укупан удео влакана у композиту обично износи до 70% од укупне запремине материјала (Д. Ћорић 2010, Akovali, 2011).

3.2.1 Материјали влакана

Као ојачање у случају полимерних композита могу се користити и друге врсте влакана као што су влакна на бази бора, силицијум-карбида или алуминијум-оксида. Композитни материјали са ојачањем израђеним од влакана бора најчешће се користе код израде војних летилица и елиса хеликоптера, чиме се постиже да хеликоптерска елиса буде и до неколико пута лакша и еластичнија у односу на остале материјале од којих се ове елисе израђују. Смањењеукупне масе елисе утиче и на укупне перформансе хеликоптера, је потребан знатно мањи обртни момент погонског ротора потребног за ротацију елисе. Са друге стране композити ојачани влакнима алуминију-оксида и силицијум-карбида користе за израду кућишта ракета.

Стаклена влакна

Стакло као материја за ојачавање композитних материјала је нарочито заступљено у изради влакана из више разлога, првенствено због релативно једноставног процеса производње код кога се из растопљеног стакла извлаче чврста стаклена влакна, па је самим тим и производња композитних материјала ојачаних стакленим влакнима економична. Осим тога, стаклена влакна у комбинацији са полимерном матрицом граде композит високе специфичне чврстоће, при чему је могуће користити стаклена влакна у комбинацији са

различитим типовима матрица и на тај начин постићи одговарајућу хемијску инертност, чиме се омогућује постојаност материјала у корозивној средини. На слици 5 приказани су вискери од стаклених влакана (DiBenedetto 2001).



Слика 5. Стаклена влакна у форми кратких вискера (Geosconproducts)

Стаклена влакна су високе чврстоће, али недовољно крута да би се као таква применила као ојачање матрице композита који се користи у носећим конструкцијама нпр. код авиона и других летилица. Поред тога, композитни материјали ојачани стакленим влакнима погодни су за употребу у подручјима која нису изложена високим температурама (до 200 °C), јер у спротном долази до губитка механичких особина материјала. Ипак, стаклена влакна високе чистоће у комбинацији са полиимидном матрицом граде чврст композит који може поднети температуру до 300 °C што га чини подесним за употребу у авиоиндустрији.

Стаклена влакна се производе од силицијум-диоксида различитим поступцима, и као таква имају слабије механичке особине од угљеничних влакана, па су самим тим осетљива на силе трења до којих може доћи услед контакта са неким тврђим материјалом. Без обзира на то, стаклена влакна имају широку примену код механичких мање захтевних конструкција, због релативно ниске цене у односу на остале типове влакана.

Стаклена влакна се могу разликовати по карактеристикама, па је сходно томе направљена слећа подела (DiBenedetto 2001):

- А-стакло – прва произведена влакна која се данас ретко користе
- С-стакло – употребљава се код композита који морају бити отпорни на киселине и базе
- Е-стакло – најчешће коришћено, отпорно на влагу и блаже хемикалије

- S-стакло - знатно чвршће у односу на остале типове стаклених влакана што га чини погодним за употребу код механички оптерећених конструкција. Карактерише га висока специфична крутост и чврстоћа.

Арамидна влакна (Кевлар)

Арамидна влакна су у основи полимерна влакна високе чврстине и крутости и одличног односа између чврстине и густине материјала. Оваква влакна су у потпуности синтетички створена, а прва су се појавила средином шездесетих година прошлог века произведена од стране компаније *DuPont* под називом „Кевлар“. Постоји више различитих типова арамидних влакана као што су: кевлар 29, 49 и 149 која се разликују по механичким особинама. (Mikheev, 2014).

Према дефиницији коју је поставила организација *US Federal Trade Commission*, арамидно влакно је синтетичко влакно грађено од линеарних макро молекула које чине ароматска једнњења повезаних амидним или имидним везама, од којих је 85% непосредно везано на два ароматска прстена. Уколико су присутне и имидне везе, њихов број не прелази број амидних веза.

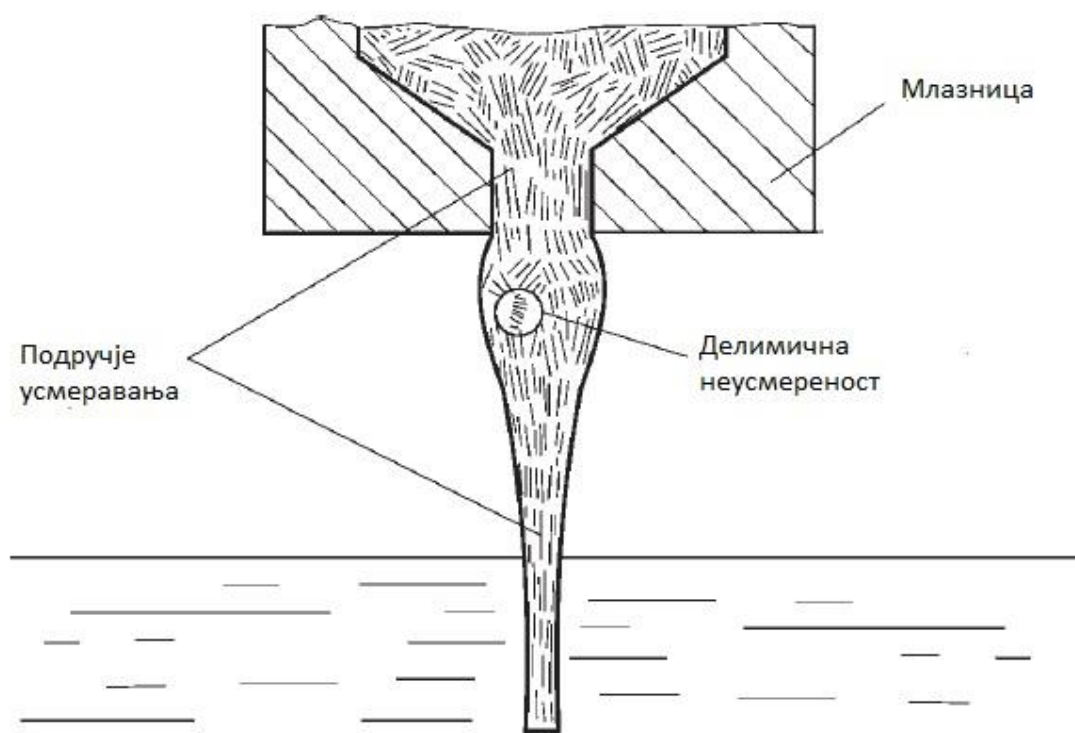
Из дефиниције се види да арамидна влакна припадају групи пластомера (ароматични полиамиди), али за разлику од њих ова влакна су стабилна при повишеним температурама тако да задржавају своје механичке особине у подручју од -200 °C до 200 °C, а постоје и арамидна влакна на бази полиимида која подносе температуру до 300 °C.

Влакна су жуте боје, релативно слабе везивне моћи са матрицом, доста скупља од стаклених влакана, осетљива на ултраљубичасто зрачење и деловање киселина. Поред тога, отпорна су на удар, замор и трење, па се може рећи да су врло крута и жилава у односу на друга влакна. За израду ојачања код композитних материјала најчешће се користе у форми тканина одн. платна. На слици 6. приказано је платно од арамидних влакана.



Слика 6. Различите тканине од арамидних влакана (Go Green Products)

Арамидна влакна одликује и добра затезна чврстоћа и ниска густина, што су особине које се јављају као последица њихове микроструктуре. Она се састоје од полимерних ланаца који се издужују у правцу влакана. Како молекуле полимера стварају површине високе крутости међусобно повезане slabим водониковим везама, изглед влакана је сличан радијалном распореду угљеничних влакана. Принцип добијања арамидних влакана је сложен хемијски поступак, при коме се анизотропни раствор истискује помоћу млазнице (приказано на слици 7).



Слика 7. Процес истискивања анизотропног раствора

Арамидна влакна се употребљавају као ојачање код матрица на бази фенолних смола у изради структурних елемената авиона, нарочито стратешких бомбардера код којих се врата отвора за бомбе тзв. „бомболук“, израђује од ове врсте композита. Арамидна влакна се такође користе код израде балистички непробојних производа као што су заштитни прслуци и шлемови за војну и цивилну употребу. Остали примери код којих се употребљавају арамидна влакна су спортска опрема, ужад, посуде високог притиска итд.

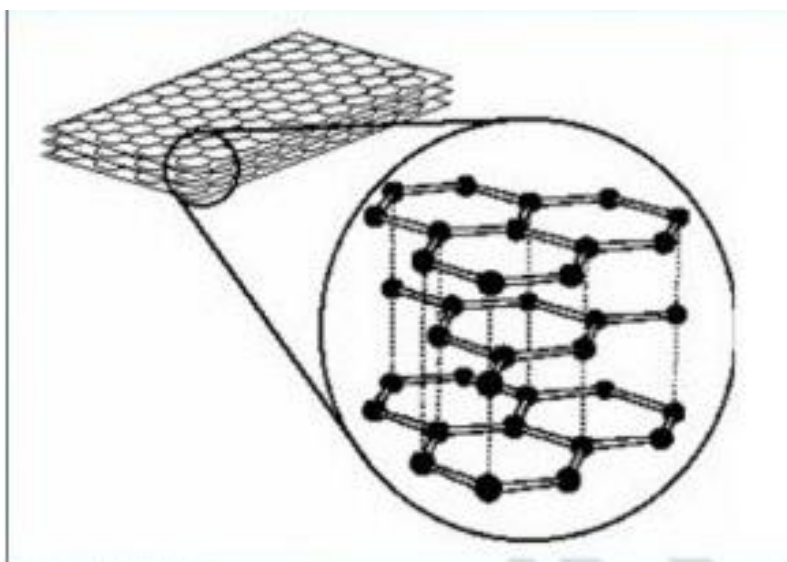
Угљенична влакна

Најчешће примењивано ојачање код савремених полимерних композита је на основи угљеничних одн. карбонских влакана, посебно код механички најоптерећенијих ваздухопловних конструкција. Постоји више разлога зашто је то тако (Huang, 2019):

- карбонска влакна имају највећу специфичну чврстоћу и крутост од свих других ојачања;
- високи модул еластичности и високу чврстоћу задржавају и при већим температурама;

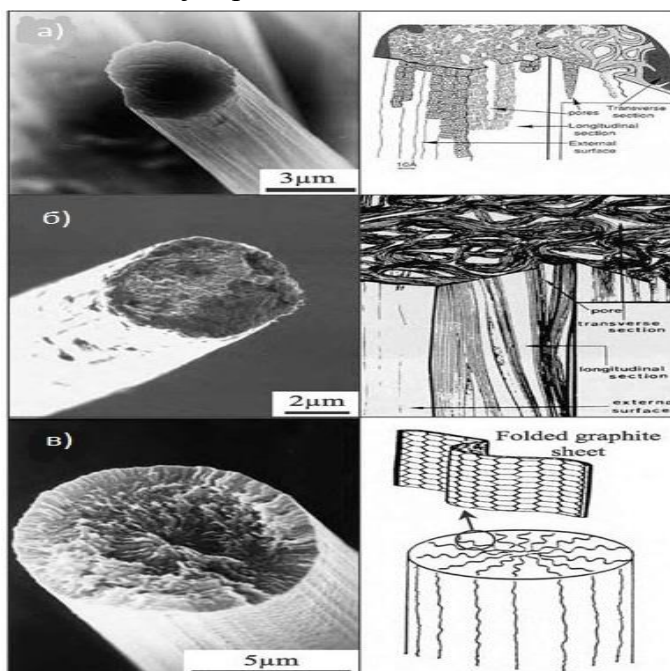
- на собној температури влакна су отпорна на влагу, као и разне друге раствараче, киселине и базе и
- поступци добијања композитних материјала који као ојачање користе угљенична влакна су релативно једноставни и економични.

Атомска структура угљеничних влакана је хексагонална мрежа атома угљеника која формира листове графита (приказана на слици 8).



Слика 8. Микроструктура карбонских влакана (Quora, 2017)

Ови листови су распоређени концентрично, радијално или преклопљени да би се обликовали влакна што је приказано на слици 9.



Слика 9. Распоред листова графита унутар влакана: (а) концентрично (б), радијално (в) преклопљено (Quora, 2017)

Угљенична влакна добијају се поступком карбонизације из различитих смола, или полиакрилонитилних PAN влакана. Ови поступци се знатно разликују као и њихови резултати. Поступком добијања из PAN влакана производе се влакна са учешћем угљеника до 50%, док се производњом влакана из смоле добијају влакна са учешћем угљеника до 80%.

Према механичким особинама, угљенична влакна деле се на (Huang, 2019):

- HT – high tenacity - високе издржљивости
- IM – intermediate modulus - умереног модула еластичности
- HM – high modulus - високог модула еластичности
- HS - high strength - високе чврстоће
- UHM - ultra high modulus - врло висок модула еластичности.

Влакна која се добијају из смоле карактерише виши модул еластичности, али и нижа затезна чврстоћа у односу на PAN влакна, што је уједно и разлог повишене кртости ових влакана. У односу на PAN, влакна која се добијају од смоле имају бољу електричну проводљивост и већег су пречника у односу на PAN влакна (10-11 μm , док су код PAN влакна 5-10 μm).

Према крутости, угљенична влакна се могу поделити у четири групе (Huang, 2019):

- стандардног модула еластичности (до 265 GPa)
- средњег модула еластичности (265-320 GPa)
- високог модула еластичности (320-440 GPa)
- ултра високог модула еластичности (приближно 440 GPa).

Ојачања од угљеничних влакана користе се код израде кућишта ракетних мотора и разних других апликација у цивилном и војном ваздухопловству, судове под притиском, као и код разних реквизита за спорт и рекреацију. За ојачавање користе се континуирана или резана влакна, која се обично превлаче слојевима епоксидне смоле која гради матрицу.

Влакна бора

Влакна бора су посебна група влакана која су сама по себи композитна јер се на постојећа угљенична или волфрамова влакна, посебним поступком наноси бор. Влакна су знатно већег пречника од осталих врста влакана (125 - 140 μm), високе су тврдоће, композитни материјали који као ојачање користе борова влакна се врло тешко механички обрађују. Данасу у великој мери ова влакна потиснута због високе цене, и замењена угљеничним влакнима, али се и даље користе у космонаутици због отпорности на високе температуре (преко 1000 °C) (Herring, 1965), као и у изради компоненти млазних мотора код суперсоничних војних авиона.

Борова влакна су једна од првих влакана коришћена у композитним материјалима са металном матрицом, при чему је матрица најчешће од алуминијума или титана.

Керамичка влакна

Керамичка влакна су у основи влакна од силицијум-карбида која се добијају сличним поступком као код борових влакана, најчешће процесом напаривања (CVD - *Chemical Vapor Deposition*), при коме се угљеникова влакна облажу силицијум-карбидом. Керамичка влакна се углавном користе за ојачавање металних матрица, али и за ојачавање керамике при чему се користе керамичка влакна од силицијум-карбида, силицијум нитрида или стакла.

Керамичка влакна се могу израдити и од полимера који садрже силицијум и угљеник и таква влакна су позната под именом *Nicalon* одн. Као побољшана *Hi-Nicalon*. Ова влакна први пут је произвела јапанска компанија Nippon Carbon Co. NCK. Произведена су у изолованој средини са малим процентом кисеоника и сушена електричним луком. Влакна су хомогене грађе и састоје се од врло финих бета-силицијум-карбидних кристала и карбона. Карактеришу их одлична затезна чврстоћа и модул еластичности, а поседују и стабилност на високе температуре, па се могу примењивати у срединама изнад 800°C. Могу се користити као ојачање код полимерних, металних и керамичких матрица. Влакна, сама по себи, су отпорна на различите агресивне хемикалије па се као таква могу користити за израду филтера, топлотних изолатора итд. (Spilker 2018.)

Метална влакна

Метална влакна се најчешће израђују од берилијума, молибдена, челика и волфрама. Употребљавају се у облику вискера, металне вуне или жице. Композитни материјали ојачани металним влакнима поседују високу еластичност и жилавост композита. Углавном се примењују код металних композита, за ојачавање пнеуматика итд.

3.2.2 Форме влакана

Влакна као ојачање композитних материјала, употребљавају се у неколико основних форми у зависности од коначног облика композитног материјала, процеса уградње влакана у матрицу и механичких карактеристика које финални производ треба да поседује. Као што је већ поменуто, влакна су углавном континуирана одн. непрекидна, или дисконтинуирана одн. сецкана како би се добили такозвани вискери чија дужина може варирати од 3-50mm.

Континуирана влакна се најчешће користе за намотавање при чему се добија матрица цилиндричног облика. Она се такође користе у форми струкова које чине снопови континуираних влакана која се извлаче заједно у паралелним сноповима. Овакви снопови се могу даље упредати како би се добила ужад или се од њих могу ткањем производити платна, која су уједно и најједноставнија за уградњу у матрицу.

Платна се најчешће употребљавају у форми трака или тканина већих површина. Траке или платна у процесу производње композита, се могу постављати у слојевима при чему се води рачуна о томе да су влакна у паралелно постављеним комадима тканине у међусобно супротним правцима. На тај начин се драстично мењају механичке особине композита. Тканине са

гушће испреплетаним влакнима имају процентуално већи удео у композиту, осим тога тканине које садрже влакна мањег пречника обезбеђују већу додирну површину између влакана и матрице. На тај начин се постиже боље преношење оптерећења па самим тим и боље механичке карактеристике материјала.

Повећањем процента укупног удела влакана у материјалу повећава се и чврстина материјала, али удео влакана у материјалу не би требао да прелази више од 70%, јер се у том случају губи на чврстини материјала, с обзиром да он не садржи довољно матрице која везује влакна.

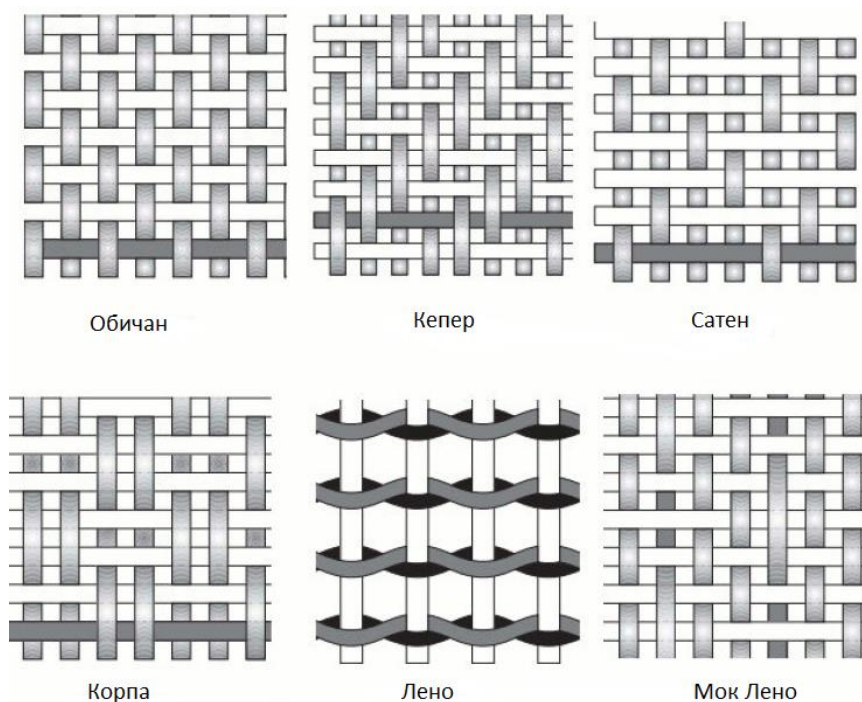
Маса влакана мери се јединицом „tex“ која означава масу у грамима по хиљадитом метру влакна.

Ткање у ширем смислу представља преплетање нити под различитим углом. Према оријентацији влакана унутар таканина оне се могу поделити на једносмерне, двоосне, вишеосне или у облику мата. Такође постоје шивене и хибридне тканине које су направљене од различитих влакана.

Код једнодирекционе тканине (*unidirectional fabrics*) већина влакана је оријентисана у истом правцу, што значи да су примарна влакна оријентисана у уздужном правцу, док су везујућа влакна оријентисана у другим правцима, и тако повезана са примарним влакнима. Овакве тканине се лакше усмеравају унутар матрице како би се постигле одређене особине у жељеном правцу. Главни недостатак ових тканина су слабије механичке особине у попречном правцу.

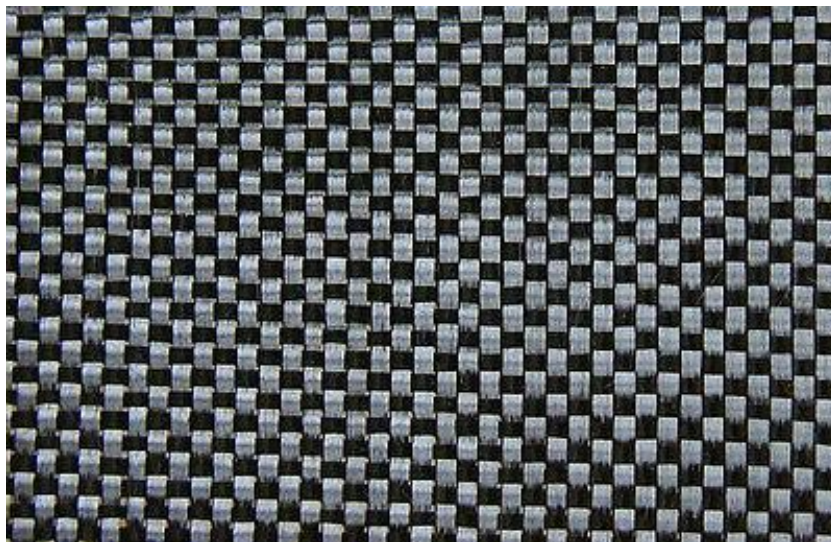
Двоосне тканине састоје се од влакана која су оријентисана у уздужном и попречном правцу. Овакве тканине добијају се преплитањем уздужних и попречних влакана. Целовитост влакана постиже се поравнањем влакана и силама међусобног трења. Оне се могу производити и међусобним прошивањем влакана. Савитљивост тканине, површинска храпавост и структура зависе од начина ткања. Најчешће коришћене врсте ткања приказане су на слици 10.

Постоји неколико основних начина израде тканина (Ћорић 2010):



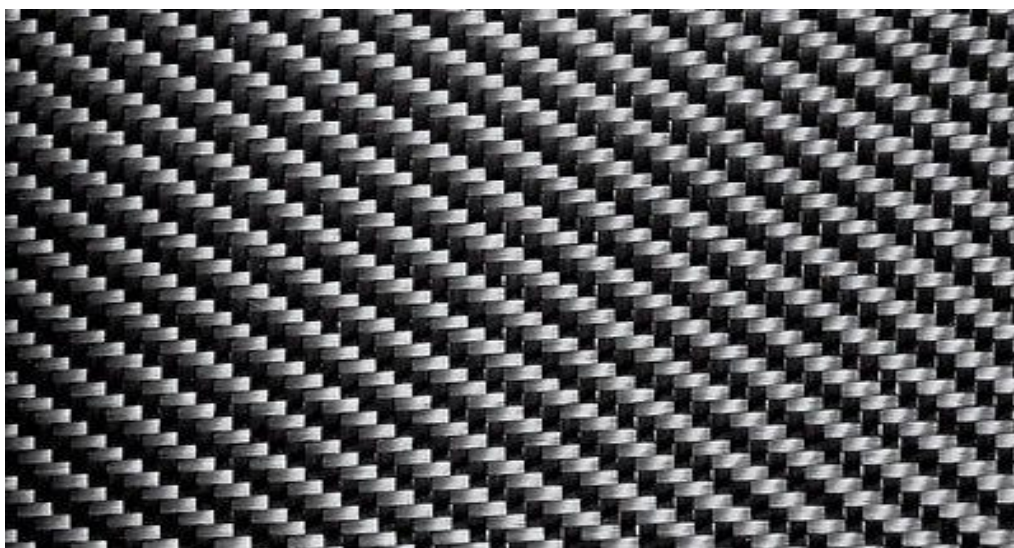
Слика 10. Најчешће врсте ткања

- *Plain* - је равна симетрична тканина код које влакна пролазе наизменично изнад и испод уздужних влакана чиме се постиже велика механичка стабилност. Ипак, овакав начин ткања у поређењу са другим има недостатке због тога што се влакна доста савијају па се ова тканина не користи за добијање великих плочастих композита. Узорак равне тканине је приказан на слици 11.



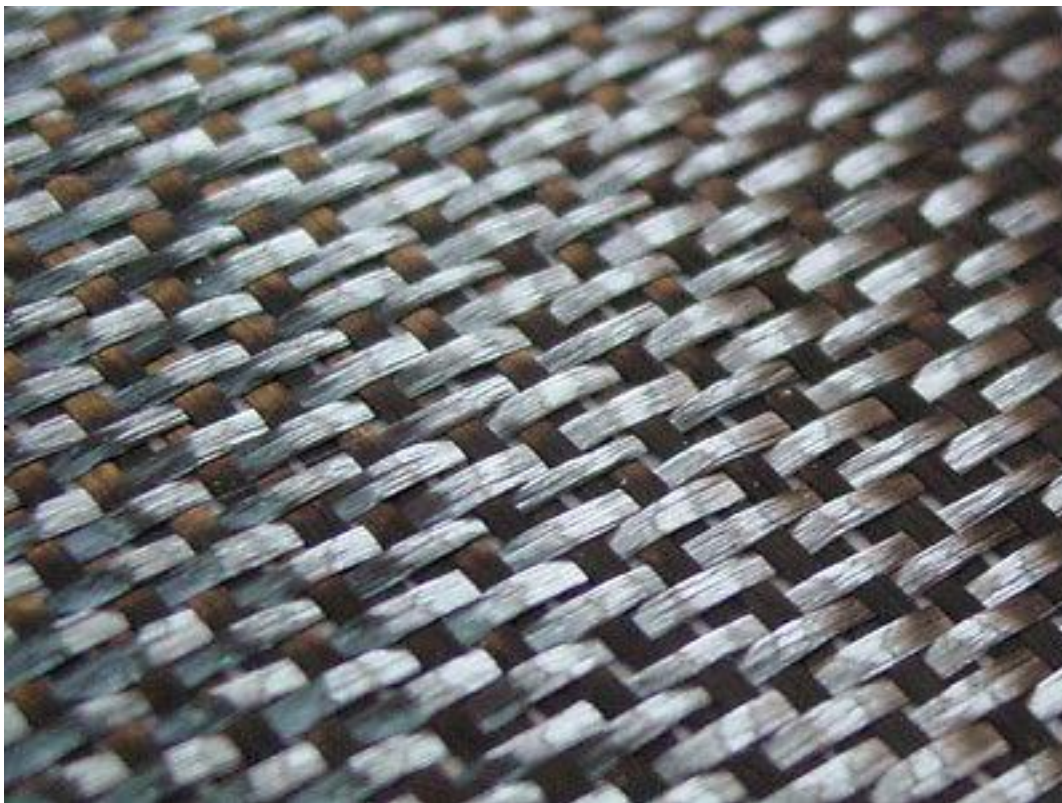
Слика 11. *Plain* тканина од карбонских влакана

- *Twill* - или кепер је тканинина код које једно или више попречних влакна пролазе испод и изнад једног или више влакана. На тај начин се добија дезен који личи на дијагоналну рибљу кост, па се због тога другачије назива и дијагонални вез. Мање је стабилан у односу на симетричну тканину али је више порозан због чега боље пријања уз матрицу. Због тога тканина има боља механичка својства. Узорак кепер тканине је приказан на слици 12.



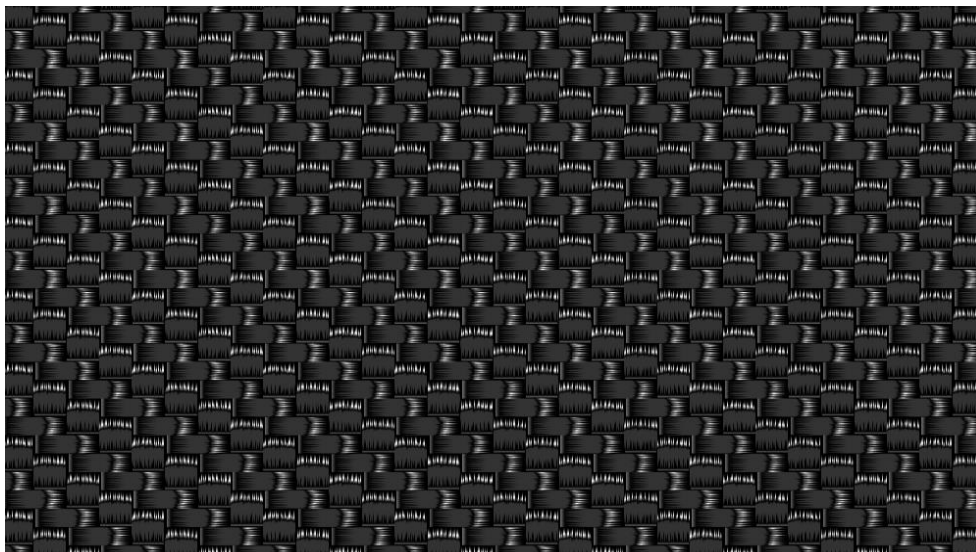
Слика 12. Кепер ткање

- *Satin* - (сатен) тканина слична кеперу. Разлика је у томе што влакна не пролазе испод и изнад сваког уздужног влакна него испод сваких неколико влакана. Сатен има добре механичке особине и савитљивост. Често се примењује код израде закривљених делова авиона и кошуљица ракета. Дезен сатен тканине је приказан на слици 13.



Слика 13. узорак сатен тканине од карбонских влакана

- *Basket* - је тканина слична обичној равној тканини са разликом у томе што су код ње испреплетана два или више влакана. Ова тканина је мање стабилна од обичне али има већу чврстоћу. Узорак ове тканине приказан је на слици 14.



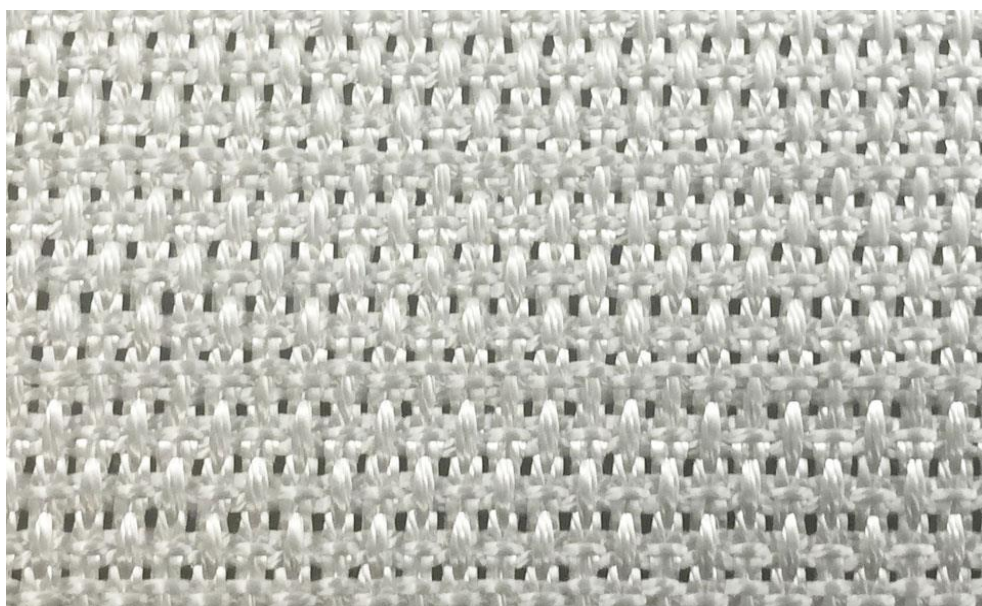
Слика 14. Узорак Basket тканине

- *Лепо* - је једносмерна тканина. Добија се преплетањем суседних попречних влакана. Карактерише је доста порозна структура, па се ова тканина користи у комбинацији са другим тканинама. Узорак ове тканине приказан је на слици 15.



Слика 15. Узорак *Лепо* тканине

- *Mockleno* - је тканина слична равној тканини али код ње влакна пролазе изнад и испод неколико уздужних. Овакве тканине су обично грубље текстуре и добре порозности. На овај начин се најчешће израђују тканине од стаклених влакана, али се могу срести и исте тканине од других врста влакана. Узорак *Mockleno* тканине од стаклених влакана приказан је на слици 16.



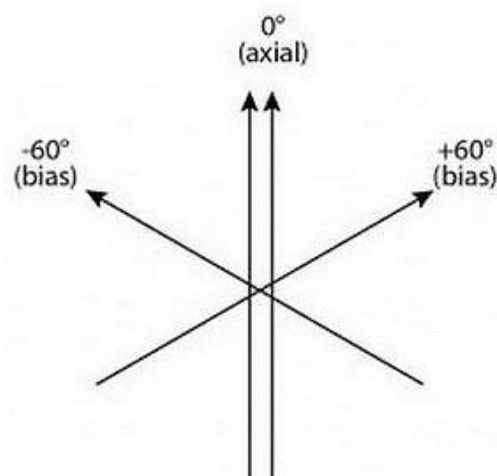
Слика 16 *Mockleno* - тканина од стаклених влакана

- *Mat* - чине слојеви произвољно оријентисаних влакана насталих у поступку рециклирања, повезаних везивним материјалом. Најчешће се користе у поступку ливења у затвореном калупу. Узорци овог материјала приказани су на слици 17.



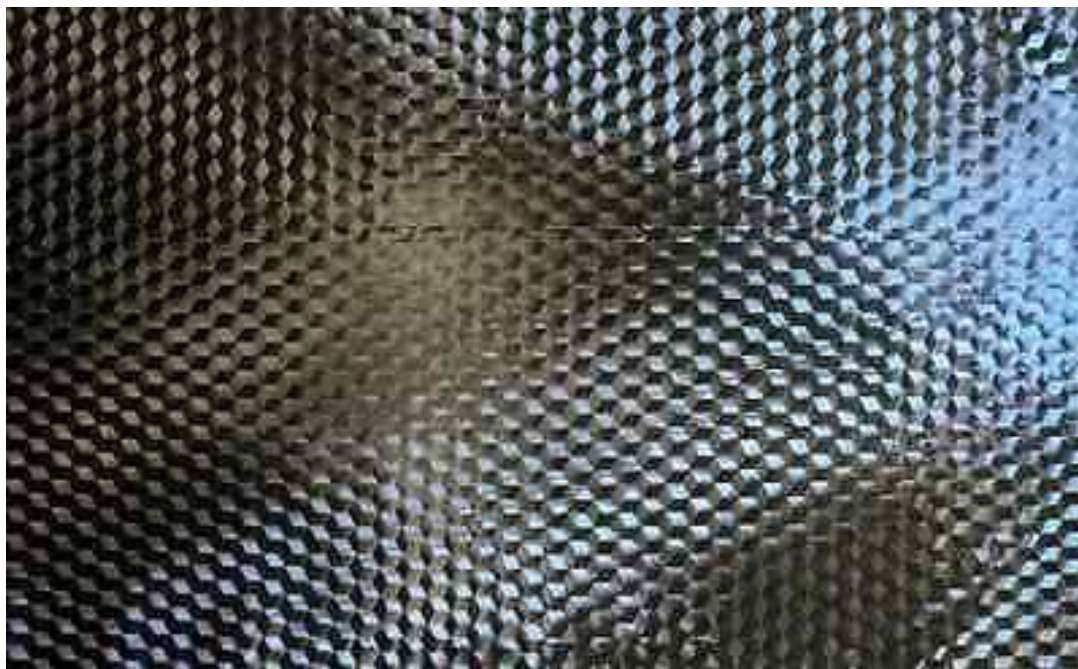
Слика17. Различити узорци *Mat-a*

Тканина се може добијати и ткањем у различитим смеровима одн. по више управних оса. Влакна код ових тканина су оријентисана у правцима које дефинишу различити углови као што је то приказано на слици 18.



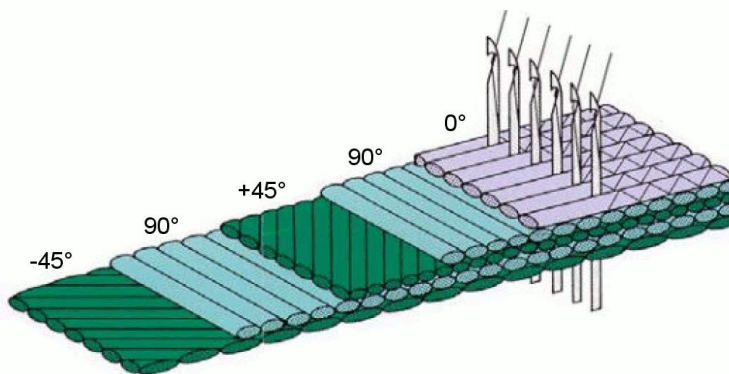
Слика18. Шематски приказ ткања у смеровима које чине три основне осе

Влакна код вишеосних тканина се повезују или шивењем и претходним импрегнирањем тзв. препрег. Узорак троосног пререга приказан је на слици 19.



Слика 19. Троосни препрег од карбонских влакана

Шивене тканине се добијају прошивањем више слојева дугих влакана оријентисаних у различитим правцима, при чему се прошивање врши неким секундарним материјалом као што је нит од полиестера. Код ове врсте тканина могуће је комбиновати различите врсте влакана. Овакве тканине имају боља механичка својства у односу на тканине које су добијене ткањем. Разлог за то је што код шивених тканина не долази до савијања влакана као што је то случај са тканинама које су добијене процесом ткања код кога су влакна међусобно испреплетана. Осим тога, код шивених тканина нема напрезања на местима укрштања влакана као код тканина добијених ткањем. Шивеним тканинама је могуће постићи већу густину влакана у самом композиту с обзиром да су оне састављене из слојева, па је тако могуће добити композитни материјал веће дебљине и густине. Основни недостатак шивених тканина је скуп и сложен процес производње, као и појава грешака у процесу шивења. На слици 20 приказан је поступак шивења тканине (Аkоvаli 2001).



Слика 20. Поступак шивења тканине

Хибридне тканине се добијају коришћењем влакана од различитих материјала у процесу ткања. Овакве тканине задржавају механичке особине влакана од оба материјала који се комбинују у једној тканини. За израду ових тканина користе се углавном угљенична и арамидна, стаклена и угљенична, као и арамидна и стаклена влакна. Хибридне тканине имају различита механичка својства у зависности од влакана која се користе, али пресудан фактор за коришћење ових тканина је естетски изглед који је значајан код делова спортских аутомобила. Ове тканине се ређе користе у авио-индустрији. На слици 21 приказан је узорак тканине која је добијена комбинацијом угљеничних и арамидних влакана.



Слика 21. Хибридна тканина

4. Поступак производње полимерних композита

Производња полимерних композита се може поделити у две веће групе које чине ливење у отвореном и ливење у затвореном калупу.

Поступци израде композита у отвореном калупу чине (Аkovali 2001):

- *Ручно слагање* – је поступак производње композитног материјала при коме се на отворени калуп наноси материјал који потпомаже одвајању готовог одливка од калупа. Након тога се у отворени калуп наноси слој матрице а, затим полаже слој ојачања, најчешће у виду тканине које је погодна обликовању у калупу. Овај поступак се понавља све док се не добије жељена дебљина материјала. Очвршћавање се одвија на собној температури. Ово је уједно и најстарији начин добијања композитних материјала ламинирањем ојачања матрице. На слици 22. приказан је поступак ручног слагања.



Слика 22. Поступак ручног слагања (Fibre Reinforced Plastic, 2009)

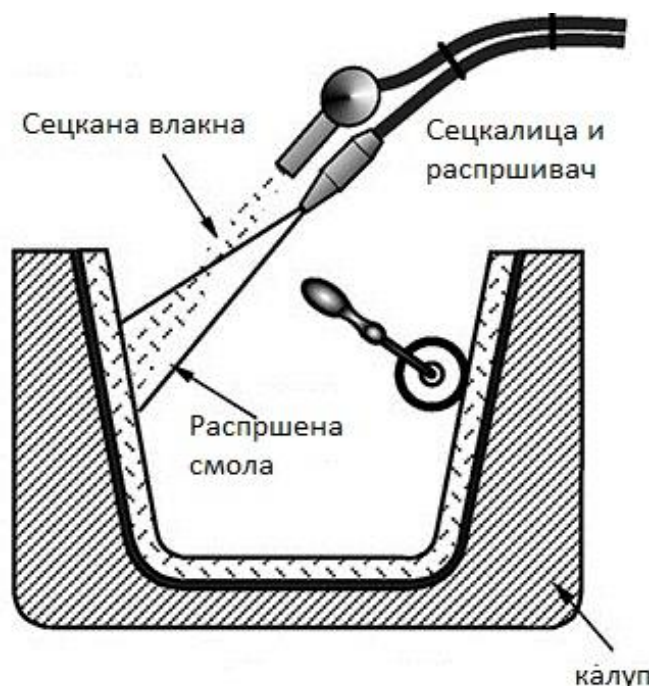
Предности овог поступка су: мали трошкови израде алата, велики избор материјала, једноставност итд. Главни недостатак овог поступка је што се приликом ламинације користе смоле ниске вискозности које у великој мери утичу на особине композитног материјала.

- *Распршивање* – је поступак при коме се сецкана влакна распршују заједно са смолом по унутрашњим странама отвореног калупа помоћу специјалног распршивача. Распршивање се обавља све док се не постигне одговарајућа дебљина материјала.

Алат за поступак распршивања укључује пиштољ са млазницом за распршивање смоле у коме се налази сецкалица влакана и систем довода смоле и ваздуха под притиском. Принцип рада овог алата је релативно једноставан. Принцип рада је такав да у исто време се до сецкалице пиштоља допрема континуирано влакно одн. сноп влакана која уситњава и под притиском меша са материјалом и течном смола. Распршивање материјала се врши истовремено помоћу компримованог ваздуха, а мешање сецканих влакана и смоле се обавља на подлози отвореног калупа. На тај начин се постиже случајан распоред влакана, а уједначеност слојева материјала првенствено зависи од руковаоца. Због

ограничења у поступку мешања смоле и влакана, код поступка распршивања, укупан удео влакана у материјалу креће се од 30% до 35%.

Постоје и алати код којих долази до мешања смоле и влакана унутар самог пиштоља. Код таквих алата могуће је остварити континуран однос смоле и влакана чиме се постиже бољи квалитет одливка и уштеда у материјалу. Због релативно малог удела влакана у матрици, након наношења материјала распршивањем обично се накнадно врши ламинирање помоћу тканине чиме се постижу боље механичке особине готовог производа. Поступак распршивања је приказан на слици 23.



Слика 23. Поступак распршивања (Mechanica Technical Solutions, 2018)

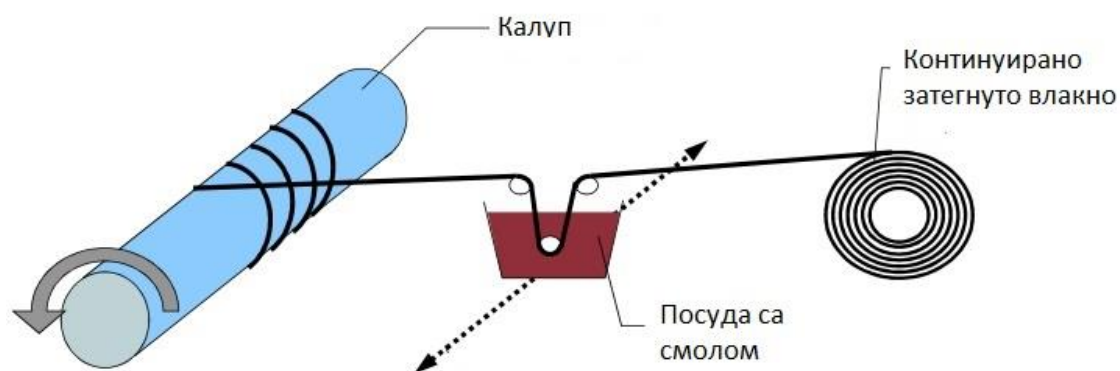
- *Техника аутоклава* - је процес при коме се добијају делови од комозитних материјала у комори под притиском познате као аутоклав пећи. У оваквим пећима налазе се електрични или плински грејачи који загревају пећ до максималне температуре од 700°C. Да би се произвео жељени комад у отворени (или у неким случајевима затворени), калуп се полаже преимпрегнирана тканина тзв. „препрег“ (*PreimPregnated*). Ова тканина садржи у себи смолу у знатно мањем проценту у односу на влакна што је чини савитљивом и подесном за обликовање у калупима. Осим тога, смола садржана у овој тканини није у потпуности сасушена што доприноси флексибилности материјала.

Након што се материјал постави у калуп, одлаже се заједно са њим у врећу из које се извлачи ваздух процесом вакумирања. Вакумирање се наставља и у самој аутоклав пећи до максималних 15 МПа. Аутоклав пећима је могуће управљати дигиталним путем, тако да се одаберу најбољи параметри процеса производње.

- *Машинско намотавање* – је поступак при коме се дуго непрекидно влакно (или сноп влакана), претходно натопљен смолом, намотава на цилиндрични модел, који у овом случају служи као отворени калуп.

Овим процесом се најчешће производе шупљи делови цилиндричног облика. За овај начин израде делова од композитног материјала могу се користити и преимпрегнирана влакна, што додатно поједностављује процес производње. Код овог начина намотавања влакана није потребно претходно квашење смолом, већ се преимпрегнирана влакна намотавају „на суво“. Везивање материјала се обавља у аутоклаву.

Намотавање при коме се претходно влакна потапају у смолу чешће се користи од преимпрегнираних влакана. У том процесу влакна пре намотавања пролазе кроз судове у којима се налази смола или ваљке натопљене истом. Судови одн. ваљци се загревају како би се повећала вискозност смоле и тако побољшало влажење влакана. Контрола нанесеног слоја смоле у овом случају је отежана због центрифугалних сила које делују на отворени ротирајући калуп и настоје одвајању матрице од ојачања. Како је овај процес машински, мора се водити рачуна о параметрима везаним за брзину намотавања и квашења влакана. Шематски приказ намотавања мокрих влакана приказан је на слици 24.

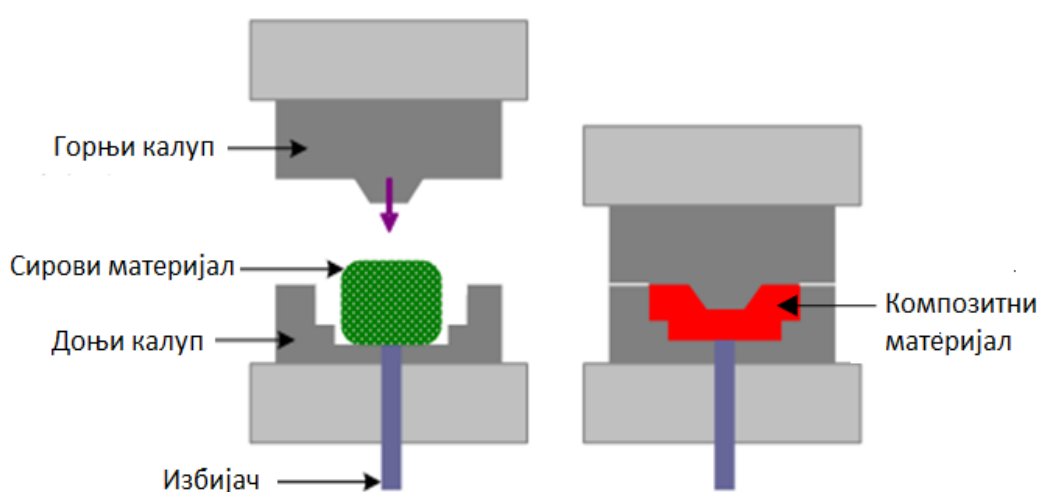


Слика 24. Поступак намотавања (Aero Space Engineering, 2018)

Постоји више начина намотавања као што су: спирално, прстенасто (паралелно) и поларно намотавање. Код спиралног намотавања језгро одн. калуп ротира око своје осе, а вођица влакна помера се паралелно са осом калупа у већим размацима. Паралелним намотавањем постиже се паралелно слагање влакна које се намотава на калуп. У том случају вођица се креће паралелно са осом калупа, као и у претходном случају, али знатно спорије како би се омогућило уједначено намотавање. Код поларног намотавања калуп је непомичан, а вођица заједно са влакном, ротира око осе калупа под одређеним углом. Када се вођица влакна једном окрене око осе калупа он се заротира за дебљину влакна.

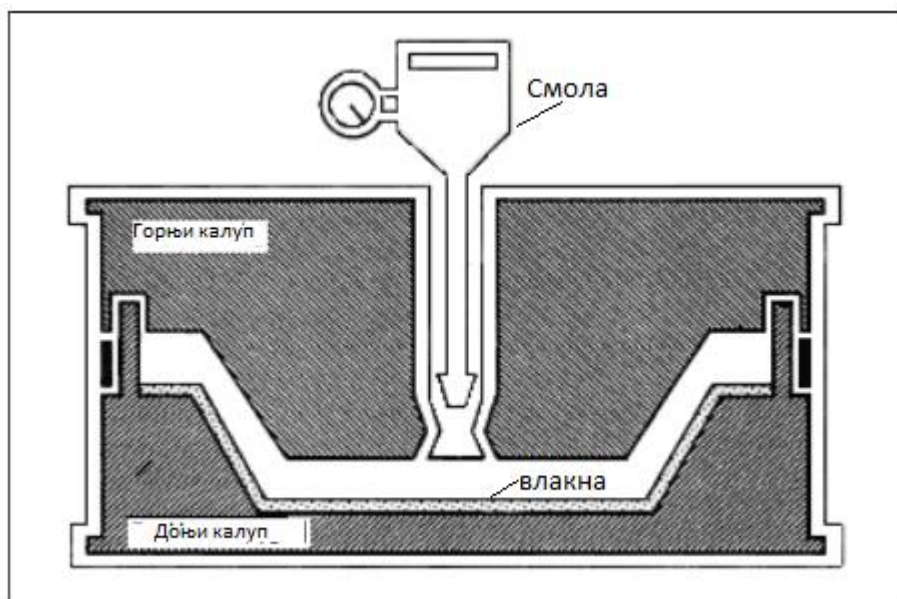
Поступци израде композита у затвореном калупу чине (Akovali 2001):

- *Топло пресовање у калупу* - у овом процесу се материјал кога чини мешавина полимера под дејством притиска и повишене температуре полимеризује, и на тај начин добијају се готови делови од композитних материјала. Поступак је сличан ковању, али је за разлику од њега потребно више времена због самог процеса полимеризације који се одвија на одређеној температури и под одређеним притиском. Процес топлог пресовања приказан је скицом слици 25.



Слика 25. Топло пресовање

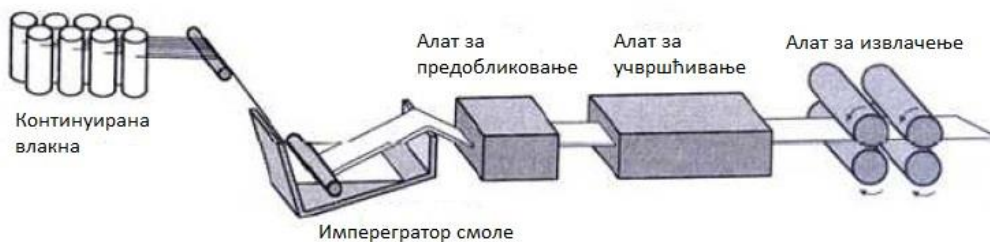
- *Инјекционо пресовање у калупу*- Технологија производње заснива се на убризгавању смоле у унапред припремљене калупе између којих се налазе влакна одн.ојачање. Калупи се загревају циркулацијом воде до одређене температуре, након чега се убризгава смола под притиском која у потпуности испуњава калуп. Готов композит након процеса учвршћивања задржава облик калупа. На слици 26. приказана је скица попречног пресека горњег и доњег калупа.



Слика 26. Процес убризавања смоле (Resin Transfer Molding)

Предности овог поступка су: велики проценат садржаја влакана у материјалу, мали садржај ваздуха, велики квалитет површине и могућност аутоматизације поступка, док су недостаци: висока цена алата, могућност појављивања грешке до којих долази услед недовољног испуњења смолом. Овим поступком могуће је лити епоксидне, полиестерске фенолне и винилске смоле, а као ојачања могу се употребљавати различита влакна (Аковали 2001).

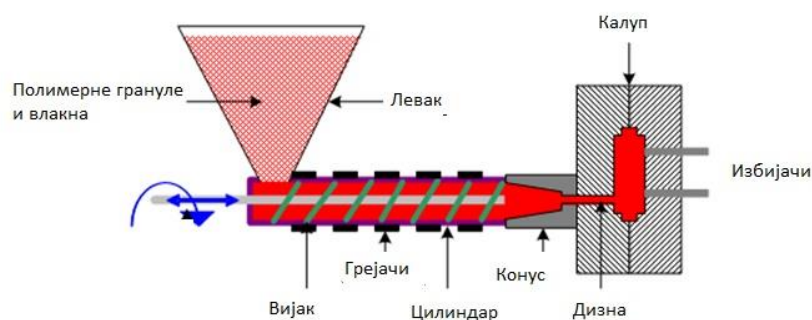
- **Пултрузија** - је поступак производње композитних материјала погодан за масовну производњу материјала стандардних димензија као што су плоче, шипкасти материјали, греде итд. На слици 27 шематски је приказан процес пултрузије (Аковали 2001).



Слика 27. Процес пултрузије

Као што је приказано на слици 27, континуирана влакна се прво импрегнирају неком од дуромерних смола, након чега се влакна натопљена смолом предобликују, а затим учвршћују помоћу алата за учвршћивање. Готов облик композитног материјала се након процеса учвршћивања извлачи помоћу алата за извлачење. Уместо континуираних влакана могуће је користити и друге форме влакнастих материјала као што су тканине и Мат модели слагања или формирања.

- *Убризгавање смоле* - Смола за израду матрице се може убризгавати у затворени калуп на исти начин као и код бризгања других полимера, са разликом у томе што се смоли додају кратка влакна, па се смола заједно са влакнима бризга у калуп. Треба напоменути да се у овом случају користи смола у форми гранулата, која се поступком загревања растапа. Овај поступак је погодан за масовну производњу полимерних композита, и делова сложене геометрије. Сам поступак је знатно бржи у односу на топло пресовање, али има знатан недостатак због употребе врло кратких влакана, па је на тај начин ограничен степен ојачања композитног материјала. На слици 28. приказан је поступак убризгавања смоле у калуп (Akovali 2001).



Слика 28. Убризгавање смоле

Као што се види на слици 28, гранулат заједно са влакнима се допрема до вијка који овај материјал потискује према калупу. У том процесу гранулат се загрева све док не постане вискозна смола. Таква смола помешана са влакнима долази до калупа док га потпуно не испуни. Након што се заврши са пуњењем једног таквог калупа, може се прећи на пуњење следећег преосталом масом из левка. Због тога је овај начин производње компоненти од полимерних композитних материјала подесан за масовну производњу.

5. Композитни материјали са металном матрицом (ММС)

И ако су у авиоиндустрији доминантни полимерни композити у различитим видовима конструкције савремених војних и цивилних летилица, композитни материјали са металном матрицом, и ако скупи за израду, представљају групу материјала која је практично незаменљива када се ради о млазним моторима високих перформанси (слика 30.) код савремених војних авиона и неким од конструкционих елемената.



Слика 30. Турбина млазног мотора направљена од металних композита (*The Future of Metal Is in Matrix Composites*, 2018)

Композити са металном матрицом сугрупа композитних материјала чија је матрица метална (по правилу дуктилана), ојачана влакнима или честицама. Ови материјали се одликују изузетно добрим механичким особинама које задржавају при високим температурама које некада прелазе и 700°C. Међутим, у односу на полимерне композите, метални композити су и даље знатно склупљи за производњу због врло сложених процеса произвођаче, што ограничава њихову употребу (*The Future of Metal Is in Matrix Composites*, 2018)

Основни проблем код производње металних композита је некомпатибилност металне матрице и влакана због хемијских реакција које се

јављају међу њима. Због тога је избор материјала за ојачање сужен. Када је у питању ојачање на бази влакана, код металних матрица најбоље су сепоказала влакна силицијум-карбида, алуминијум-оксида, угљеника, бора и борових влакана пресвучених силицијум-карбидом (*Borsic*).

5. 1 Поступци производње

Процеси производње се могу поделити на примарне и секундарне. Примарним процесима подразумевају уградњу ојачања у матрицу, док секундарни процеси подразумевају накнадну прераду композита у коначни облик. У неким случајевима, у зависности од врсте процеса производње, примарни и секундарни процеси се могу одвијати у исто време.

Избор материјала зависи првенствено од механичких и хемијских карактеристика ојачања и матрице, дужине влакана итд. Осим тога потребно је познавање кинетике и термодинамике због могућих реакција између материјала који се комбинују, као и радне температуре на којима се одвијају жељени процеси.

Процеси добијања металних композита се такође могу поделити на поступке добијања у чврстом и течном стању (*The Future of Metal Is in Matrix Composites*, 2018):

- *Процеси у чврстом стању* - Ови процеси одвијају се на нижим температурама и могуће је боље контролисати термодинамичке и кинетичке граничне равни. Две основне групе ових процеса чине синтеровање и дифузно спајање. Дифузно спајање обавља се при повишеној температури и притиску, али овај процес мора бити ограничен како не би дошло до пораста нежељених кртих фаза. Ограничење процеса дифузије се најчешће обавља истискивањем слоја влакана из матрице помоћу посебних алата. Ради ограничења процеса дифузног стања могуће је и топло ваљање, али се процес мора строго контролисати како не би дошло до прекомерне деформације материјала и оштећења влакана. Овим поступком добијају се материјали на бази бора и алуминијума, где бор чини ојачање, а алуминијум матрицу.
- *Високотемпературна синтеза* - је још један процес производње композита у чврстом стању топлим пресовањем. Овим процесом добијају се метални композити пресовањем праха, а полазне сировине чине алуминијум и титанијум-оксид. Сличан овом процесу је и *Металургија праха* (*Powder Metallurgy - PM*), приликом кога се остварује повезивање металног праха са плочицама или вискерима низом корака.
- *Процеси у течном стању (Liquid Processing)* - су процеси при којима се матрица у виду течног металног раствора везује за влакна. Како услед високе температуре (због нежељених хемијских реакција), не би дошло до оштећења влакана она се често превлаче слојевима титанијум-диборида, као што је то случај са композитом чија је матрица алумијумска.

Постоји много метода заснованих на процесуирању композита у течном стању као што су: ливење у калупу, ливење мешањем, ливење истискивањем, ливење у полутечном стању, ливење у полукрутом стању итд.

За ваздухопловне конструкције посебно су развијени композити са алуминијумском матрицом, ојачаним углавном неметалним материјалима. У неким случајевима алуминијумске легуре се могу ојачати и влакнима бора што додатно појачава затезну чврстоћу материјала док је густина јако мала у односу на неојачане легуре алуминијума. Један од примера употребе оваквих композитних материјала је конструкција Спејс Шатла направљена од В/Ал композита при чему је остварена уштеда у маси конструкције од око 45% у односу на неојачане алуминијумске легуре (слика 31).



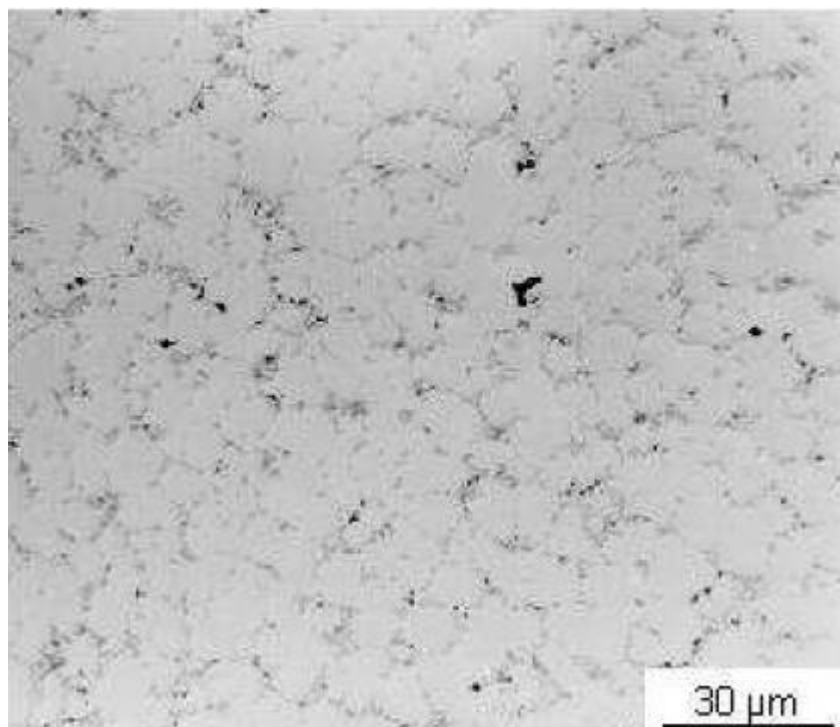
Слика 31. Конструкција Спејс Шатла

5.2 Композити са алуминијумском матрицом

Највећи удео на тржишту металних композитних материјала имају управо композити чија је матрица израђена од алуминијумских легура (*АМС - Aluminium Matrix Composites*). Основни разлог за то је релативно мала маса у односу на чврстоћу која се постиже ојачањем, што је битан фактор код избора материјала у ваздухопловној индустрији. Од великог значаја су и топлотна својства алуминијума. Тачка топљења алуминијума је са једне стране довољно висока да задовољи потребе различитих ваздухоплова, а са друге довољно ниска да производњу учини прихватљивом (Mirle, 2003).

Ојачање се додаје алуминијумским легурама ради постизања веће чврстоће, али се том приликом често губе неке друге механичке особине као што је еластичност. Укупан проценат ојачања у овој врсти композита може достићи и до 70%. Матрица може бити ојачана кратким влакнима, честицама, континуираним влакнима или чак дебљим нитима. Ојачањем алуминијумске матрице повећава се модул еластичности са 70 GPa чак до 240 GPa, као и затезна чврстоћа, отпорност на хабање, али се снижава топлотна еластичност до 70%.

Алуминијумске матрице ојачане честицама, најчешће као ојачање користе честице алуминијум-оксида, силицијум-карбида или титанијум-борида (слика 32). Најчешће коришћени материјал за ојачање алуминијумске матрице је силицијум-карбид првенствено због прихватљивог односа физичких особина и цене материјала.



Слика 32. Алуминијумска матрица ојачана титанијум-боридом

Метални композити добијени комбинацијом силицијум-карбида и алуминијума имају повишену чврстоћу, већу отпорност на хабање и бољу температурну стабилност у односу на алуминијум без ојачања, при чему се маса композита не повећава. Осим тога, овакви композити имају мањи коефицијент топлотног растезања чија се вредност може контролисати процентом силицијум-карбида у материјалу. У поређењу са неојачаним алуминијумом, овај композит задржава затезну чврстоћу коју има на собној температури чак и када се материјал загреје до 260 °C (Mirle, 2003).

Код композита са алуминијумском матрицом могу се користити и континуирана влакна бора. Ова врста композита карактеристична је по томе што поседује изузетну чврстоћу, крутост и ниску густину борових влакана. Укупан раст специфичне крутости материјала, коју чини однос модула еластичности и густине је код борових влакана неколико пута већи у односу на челик, магнезијум, алуминијум и молибден, што је велика предност јер не долази до микросавијања влакана у матрици под оптерећењем. Друге физичке и механичке особине овог композита су: термална и електрична проводљивост, дуктилност и жилавост, као и могућност обликовања, спајања и превлачења материјала.

Поред бора, као ојачање алуминијумске матрице може се користити и угљеник. Овај композит је био популаран шездесетих година прошлог века због својих добрих карактеристика и релативно ниске цене. Угљенична влакна имају висок модул еластичности и негативан коефицијент топлотног истезања, али су

ипак угљеник и алуминијум неодговарајући материјали за кобиновање у сврху добијања композитног материјала, првенствено због лоше адхезије угљеничних влакана и растопљеног алуминијума, као и оксидација алуминијума услед повишене температуре неопходне за топљење алуминијума.

5.3 Композити са магнезијумовом матрицом

Од магнезијумових композита очекују се отприлике исте особине као код композита са алуминијумском матрицом, а то су: чврстоћа, мала маса, низак коефицијент топлотног истецања итд. Заправо, избор између ова два материјала за израду матрице првенствено зависи од масе и отпорности на корозију. Густина магнезијума је отприлике за трећину мања од густине алуминијума, али је зато магнезијум више подложен корозији од алуминијума. Магнезијум такође има нижу топлотну проводљивост у односу на алуминијум, па је овај фактор често пресудан када се ради о избору материјала матрице. За сад се користе матрице магнезијума у комбинацији са ојачањем од угљеничних влакана за потребе свемирских конструкција, матрице са кратким влакнима алуминијум-оксида за делове аутомобилских мотора и материјала у електроници (Јауарра, 2018).

5.4 Композити са титанијумском матрицом

Титанијум као метал карактеришу добре механичке особине на собној и повишеним температурама, као и отпорност према корозији. Због тога се композити са матрицама од титанијума све више употребљавају у авиоиндустрији код суперсоничних војних авиона. У поређењу са алуминијумом титанијум задржава своје физичке карактеристике и при већим температурама. Међутим, титанијум није једноставно комбиновати са другим материјалима који се користе као ојачања због његове високе реактивности према другим елементима. Због тога се у авиоиндустрији користе композити на бази титанијумске матрице ојачане дисконтинуираним влакнима силицијум-карбида. Овакав композит има значајне предности у односу на неојачане титанијумске легуре (Attar, 2018).

4.5 Композити са бакарном матрицом

Композити са бакарном матрицом се углавном користе када постоје захтеви за топлотном проводљивошћу и чврстости при високим температурама. Ове особине композити са бакарном матрицом далеко превазилазе оне са алуминијумском. Бакарне матрице се могу ојачавати континуираним волфрамовим влакнима, и овакав композит је први пут произведен педесетих година прошлог века. Због своје високе чврстоће на температурама до 950 °C, ови композити се користе за облагање страница комора за сагоревање код ракетних мотора. Поред ојачања волфрамовим влакнима, бакар се може ојачавати и угљеничним континуираним влакнима. У том случају долазе до изражаја карактеристике као што су ниска густина материјала, повећана чврстоћа, као и изложеност високим температурама (Karwan 2016).

5.6 Композити са матрицом од суперлегура

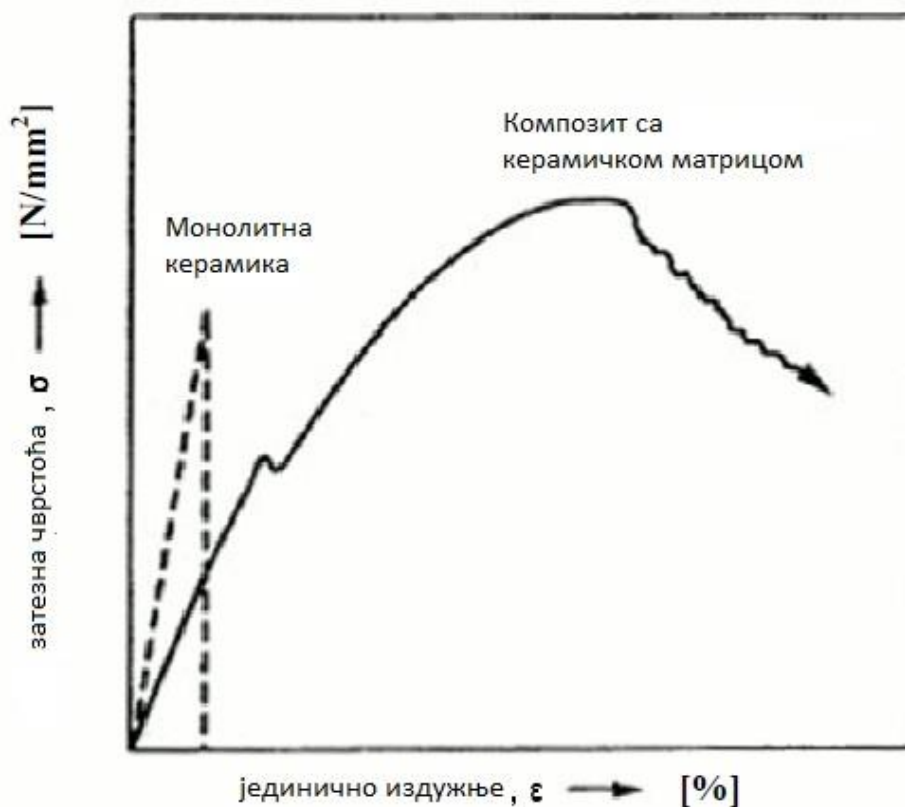
Суперлегури се углавном употребљавају код израда турбина на млазним моторима, па су као такве прве узете у обзир што се тиче израде металних матрица како би се побољшала својства материјала за израду турбина. Значајан фактор код ових композита је повећана толеранција на високе температуре, што представља битну карактеристику код израде млазних мотора. Композитни материјали са матрицом од суперлегура развијани су још од шесдесетих година прошлог века, па све до данас.

Постојност и чврстоћа супер легура може се постићи само помоћу ојачања металним влакнима са високом тачком топљења, као што су: волфрам, молибден, тантал и нобијум. Најјача до сада развијена влакна од волфрамове легуре имају чврстоћу од 2070 МПа при температури од 1095 °C (Ђорић, 2010).

6. Композити са керамичком матрицом (CMC-Ceramic Matrix Composite)

Керамика је опште познати материјал способан да поднесе екстремно високе температуре на којим задржава своје механичке особине, као и отпорност на трење и корозију. Битне карактеристике керамике су висока тврдоћа и мала маса. Међутим, основни недостатак керамике је њена кртост и односу на већину метала, па је то и основни разлог за израду композита са керамичком матрицом код кога би се смањила кртост основног материјала (Ћорић, 2010).

На слици 33 графички је приказан упоредна крива напрезања-истезања композитног материјала са керамичком матрицом и монолитне керамике.



Слика 33. Упоредна крива истезања

Према графику приказаном на слици 33, јасно се уочава разлика између монолитне керамике и композитног материјала са керамичком матрицом. Пре свега уочава се пораст границе еластичности код композита са керамичком матрицом у односу на монолитну керамику.

Матрице се могу поделити у две основне групе:

- *Оксидна керамика* - има нешто бољу топлотну и хемијску стабилност, а чине је Al_2O_3 , SiO_2 , Ва, LiиСа-алуминосиликати.
- *Неоксидна керамика* - поседује боља механичка својства а чине је: SiO , Si_3N_4 , ВСитд.

За ојачање керамичке матрице употребљавају се дисконтинуирана и континуирана ојачања. Од дисконтинуираних ојачања користе се честице и вискери, најчешће од материјала као што су: цирконијум-оксид, алуминијум-оксид, ако се ради о честицама одн. силицијум-карбид и силицијум-нитрид када су у питању вискери. Ова ојачања имају ниже механичке особине, али њиховом употребом композитни материјали се могу производити неким од поступака производње монолитне керамике, што појефтињује процес производње па самим тим и цену композитног материјала. Осим дисконтинуираних влакана користе се и континуирана влакна која композиту придодују боља механичка својства, али је поступак производње таквог композита знатно сложенији, па самим тим и скупљи. Влакна се израђују од материјала као што су: алуминијум-оксид, угљеник и силицијум-карбид који се најчешће примењује за ојачање керамике због високе чврстоће и топлотне стабилности.

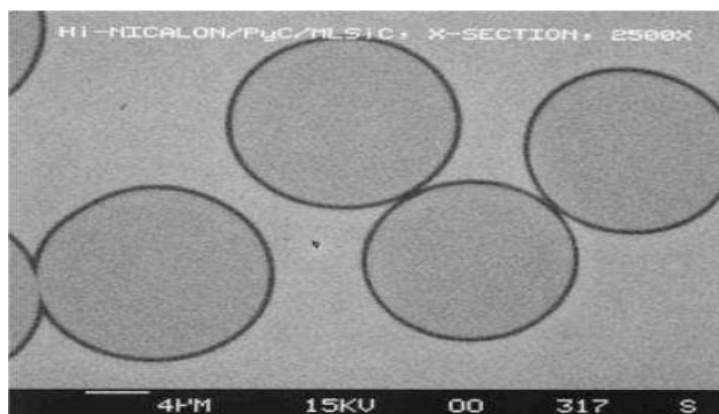
Уградњом ојачања једне врсте керамике у другу, границе лома се могу повећати и до 10 пута. До тога долази зато што честице или вискери који служе као ојачање спречавају напредовање микропукотина кроз композит. У случају керамичких композита ојачаних цирконијум-оксидом, спречавање напредовања микропукотина је последица фазне трансформације цирконијум-оксида у близини пукотине, што за последицу има појаву притиска при коме се пукотина затвара. У случају керамичких композита ојачаних влакнима до успоравања напредовања пукотине у материјалу долази услед премошћавања пукотине влакнима и апсорбовањем енергије услед истезања материјала. Тада долази до прерасподеле напрезања на ивичним деловима пукотине. Влакнима ојачана керамичка матрица у односу на неојачане керамичке материјале има и предност код расипања чврстоће материјала. Ојачани керамички композити су изузетно отпорни на појаву трења и нагле промене температуре.

Композитни материјала са керамичком матрицом производе се поступком топлог пресовања, топлог изостатичког пресовања и синтеровањем.

Керамички композити се користе код израде механички и триболошки оптерећених делова који су при томе изложени температури већој од 1600 °C као што су нпр. делови млазних мотора (Ћорић, 2010).

6.1 Композити са матрицом од силицијум-карбида

Ови композитни материјали се врло често могу срести у индустријској примени. Као ојачање код ових материјала најчешће се користе континуирана влакна. Значајне карактеристике овог материјала су: висока топлотна проводљивост, мала маса, добра отпорност на корозију и хабање. Они су такође отпорни на екстермно високе температуре до 1500°C, због стварања слоја оксида на површини материјала. На слици 34 приказана је микро структура овог композита (Ћорић, 2010).

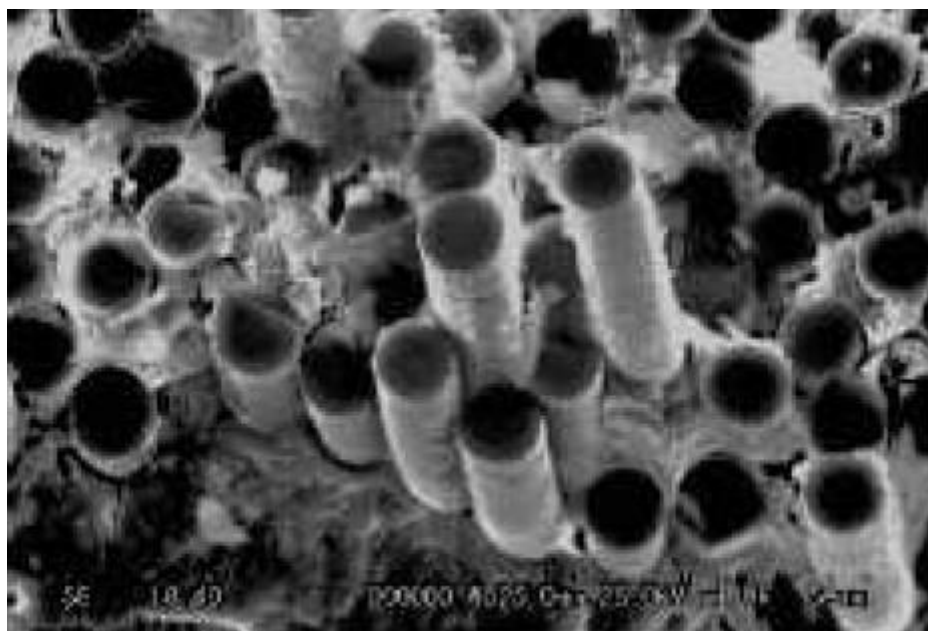


Слика 34. Микро структура композита са SiC

Као ојачање код овог композита користе се континурана угљенична влакна. Развијено је доста релативно једноставних поступака уградње ојачања у матрицу што доста појефтињује цену овог композитног материјала. Ипак, критична фаза у процесу производње овог композита је контакт влакана са растопљеним материјалом, при чему може доћи до смањења чврстоће и повећања кртости материјала (Ћорић, 2010).

6.2 Композити са матрицом од алуминијум-оксида

За ојачање матрице од алуминијум-оксида користе се влакна од истог керамичког материјала, с тим што се материјал превлачи одговарајућим превлакама као што су: угљеничне превлаке, CeO_2 , ZrO_2 итд.



Слика 35. Микроструктура композита са матрицом од алуминијум-оксида

Овај композитни материјал се одликује високом тврдоћом, температурном стабилношћу, отпорношћу на хабање, отпорношћу на корозију итд. Микро структура овог композитног материјала приказана је на слици 35 (Ћорић, 2010).

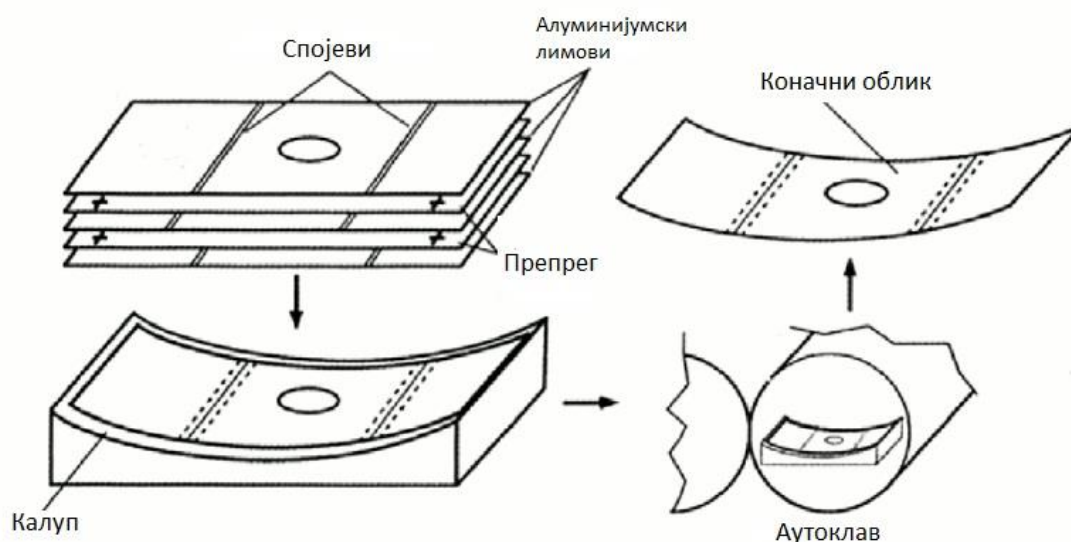
7. Ламинирани (слојевити) композитни материјали.

Композитни материјали заступљени у индустрији (поготово у ваздухопловству и аеронаутици), се најчешће користе у комбинацији са већ постојећим материјалима, који према својим механичким и физичким карактеристикама одговарају тој намени. То су најчешће легуре алуминијума, које су са једне стране довољно чврсте, док са друге стране имају релативно малу масу у поређењу са другима материјалима који задовољавају поменуте механичке особине, али је њихова маса знатно већа као што су то нпр. легуре челика. Однос укупне масе и чврстине конструкције је један од пресудних фактора када су у питању различите врсте ваздухоплова, јер је у том случају потребно остварити што је могуће лакшу и у исто време чвршћу конструкцију, првенствено због уштеде енергената који су потребни за ефикасан рад летилица (Tamer 2001).

7.1 Слојевити *Glare* (GLAss - REinforced fibre metal laminate), КОМПОЗИТИ.

За намене у ваздухопловној индустрији често се користе такозвани „*Glare*“ ламинат, који у себи садрже слојеве алуминијумског лима, који су додатно ојачани стакленим влакнима (Tamer 2001).

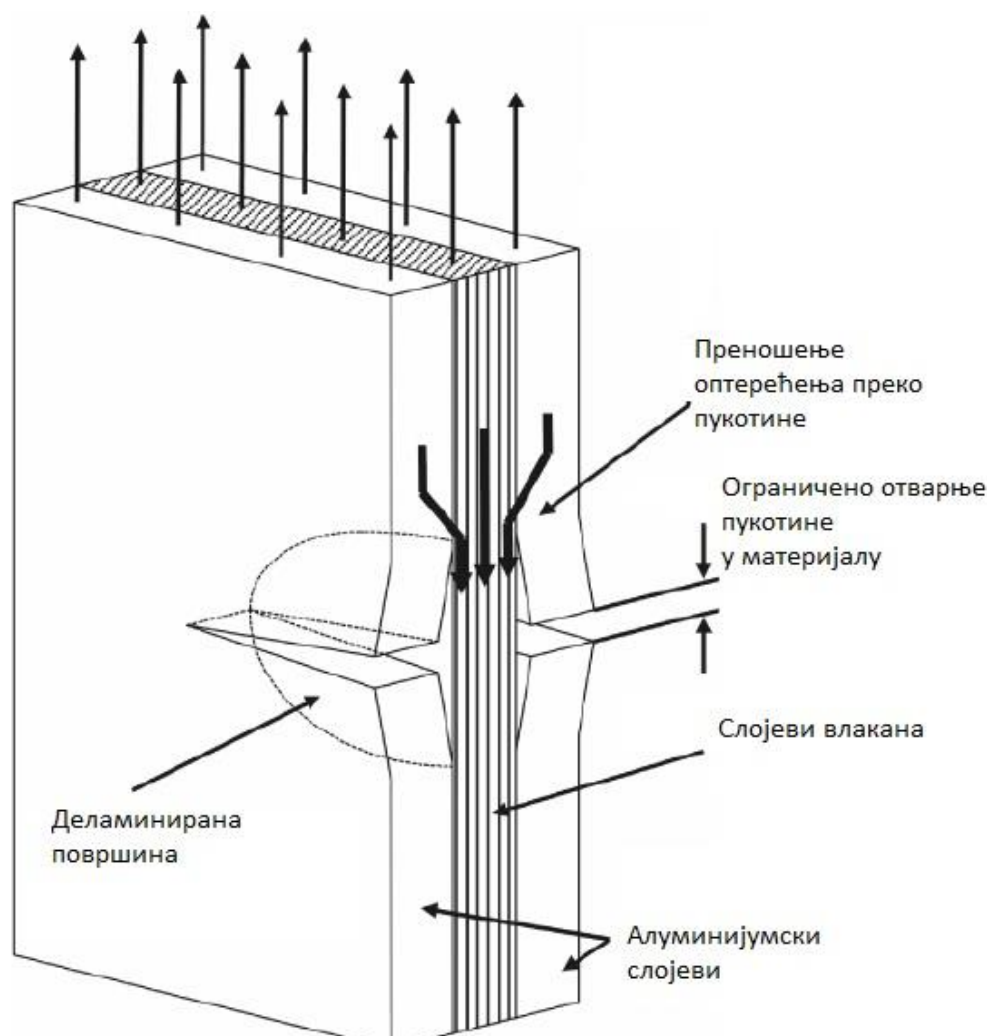
На слици 36. приказан је поступак израде слојевитог (ламинираног), композитног материја.



Слика 36. Поступак производње *Glare* ламината.

Постављењем препрега (претходно импрегниране тканине од стаклених влакана натопљене смолом), између слојева алуминијумских лимова добија се једна врста „сендвич“ конструкције, која се затим поставља у калуп који одговара коначном облику. Везивање импрегниране тканине и слојева алуминијума,

постиже се полагањем материјала заједно са калупом у аутоклав комору. Аутоклав је посебна врста пећи која саджи комору високог притиска (до 15МПа), у која је начешће испуњена ваздухом или угљен-диоксидом. Овакве пећи се загревају помћу плинских горионика или електричних грејних тела до максималне температуре од 700°C. Рачунарским управљањем параметри притиска и температуре се могу мењати према потреби, и тако постићи унапред задати циклуси загревања и промена притиска. Након завршеног процеса везивања слојева препрега са алуминијумским лимовима добија се производ начињен од *Glare* материјала, који задржава облик претходно геометријски одређен калупом у који је постављен. Од посебног значаје приликом пројектовања делова од *Glare* ламинате је оријентација влакана у појединим слојевима, јер орјетнација влакана знатно утиче на различите механичке особине материја, што се у великој мери одражава на овакву врсту ламинате. *Glare* ламинате одликује већа затезна чврстоћа у односу на алуминијумске легуре уз задржавање релативно мале масе (Tamer 2001).



Слика 37. Премошћивање пукотине у материјалу помоћу стаклених влакана

Друга важна карактеристика ових ламинате је и отпорност на пуктине у слојевима алуминијума, које се могу јавити услед деловања различитих напрезања. У случајевима када до пукотина у материјалу ипак дође, стаклена

vlakna успешно премошћују пукотине (слика 37.), спречавајући тако да дође до даљег ширења пукотина кроз материјал (Tamer 2001).

Осим *Glare* ламината, нарочито у авиоиндустрији, често се користе и слојевити композитни материјали као што је нпр. „*Arall*“ (*ARamid-ALuminum Laminate*). Поступак производње делова од ових је готово исти као и у претходном случају, али је разлика у томе што се код *Arall* ламината користе претходно импрегнирана арамидна влакна која имају другачије механичке карактеристике од стаклених влакана. Из тог разлога *Arall* ламинати су што скупљи у односу на *Glare* ламинате, али се упркос томе користе за израду делова који захтевају већу затезну чврстоћу.

7.2 Сендвич конструкције

Под термином „сендвич“ - конструкције, подразумевају се конструкције које се састоје од два спољашња слоја неког танког материјала између којих се налази материјал за попуњавање и обично је мале масе. Језгро оваквих конструкција је најчешће тродимензионално. Улога тродимензионалног језгра је да материјалу пружи довољну чврстоћу и крутост у различитим условима оптерећења. Захваљујући малој маси, овакве конструкције одликује висока специфична чврстоћа као и крутост конструкције, уз знатно смањење масе (Tamer 2001).

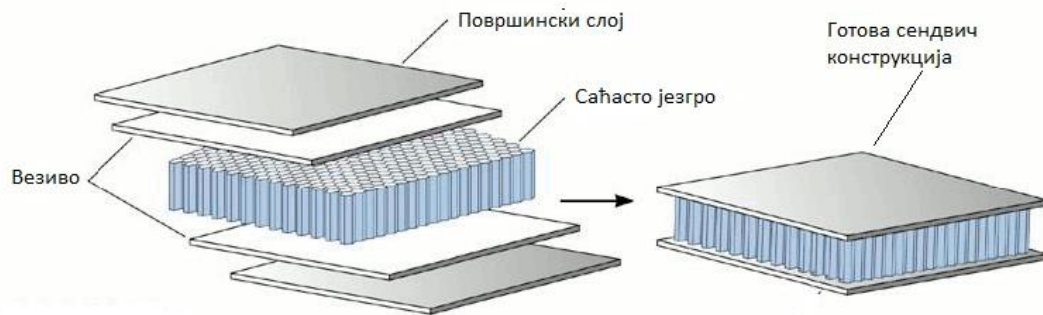
Најједноставнији пример овакве конструкције користи се код картонске амбалаже где као основни материјал користи картон, који се састоји од два танка слоја између којих се налази језгро (такође од танког картона или папира), које је моделовано тако да ствара тродимензионални облик, и његов задатак да готовом полчастом материјалу обезбеди довољну крутост (Tamer 2001).

Као материјали намењени за израду језгра код сендвич конструкција намењених ваздухопловству најчешће се користе:

- полимерне пене од: поливинил-хлорида, полистирена, полиуретана, полиестер-имида, као и акрилне пене густине од 40 до 200 kg/m³;
- алуминијум или полимерни композити (најчешће арамидна влакна са дуктилном матрицом као што је поликарбонат, полипропилен итд);
- у неким случајевима врсте лаког, али довољно чврстог дрвета као што су: балза, кедр итд.

У ваздухопловној индустрији су од посебне важности сендвич конструкције које садрже алуминијумско језгро у облику пчелињих саћа, док се као спољни омотач овакве конструкције користе различити ламинати. На тај начин се добија веома постојаа, чврста и изузетно лагана конструкција, која има због својих предности налази шитоку примену у изради различитих летилица (Tamer 2001).

На слици 38. шематски је приказана једна оваква конструкција.



Слика 38. Сендвич конструкција са саћастим језгром

Треба нагласити да се саћаста језгра ових конструкција, поред калсичног шестоугаонг профила сваке од појединх комора саћа, могу израђивати и у другим облицима у зависности од начина профилисања.

Композитне сендвич конструкције се најчешће користе код делова авиона који спајају труп и крило, као што је то случај код путничког авиона *AirbusA380* за чију израду је потребно око 100 оваквих панела (Tamer 2001).

8. Механика композитних материјала

Композитни материјали се састоје од разних врста влакана или честица и еластичне одн. дуктилне матрице. Како постоји велика разлика у физичким особинама између матрице и ојчања, у току процеса производње могу се јавити заостала напрезања у материјалу, првенствено због тога што су влакна много мање еластична у односу на матрицу. Када се овоме додају услови процеса производње, који укључују хемијске процесе у току стврдњавања матрице, изложеност спољним утицајима температуре и притиска (аутоклав), затим различити спољни утицаји као што је температура околне средине и влажност ваздуха (ако је у питању ливење у отвореном калупу), напрезања у самом материјалу које се јавља као последица стврдњавања, може се закључити да су композитни материјали већ у току процеса производње изложени различитим напрезањима, која најчешће остају у њему и након завршетка процеса производње. У зависности од процеса производње, мешања компонената матрице и ојчања, као и од избора поменутих компоненти које се користе за израду ових материјала, може се рећи да оваква напрезања варирају у зависности од врсте композита који се израђују.

Како је поље испитивања различитих врста композитних материјала веома широка област, у овом поглављу биће представљени само основни принципи као што су (Niu, 1988):

- Микромеханика - композитних материјала која различитим методама (аналитичким и нумеричким), указује на механичка својства влакана и матрице, која се могу одразити на целокупни композитни материјал.
- Макромеханика – која узима у обзир механичке особине свих слојева композита (ламинати), њихову дебљину и орјентацију влакана у координатном систему, па се на основу тога могу утврдити механичке карактеристике целокупног композита, као што су: вредности компоненти тензора напрезања и деформисања у слојевима из којих се могу одредити вредности слила и момената.
- Критеријуми попуштања композита – лом матрице, пуцање влакана итд.

8.1 Тензор еластичности за различите материјале.

Тензор еластичности C_{ij} чини веза између Кошијевог тензора напрезања и тензора деформације. Ако се ове вредности представе у форми вектора, а тензор еластичности у облику матрице следи да је (Jones, 1975):

$$\sigma = C\varepsilon$$

Где је σ – тензор Кошијевих напрезања, ε - вектор укупних деформација, док C представља тензор еластичности. Како су напрезања и деформације тензори другог, а еластичност трећег реда, овај израз се може записати и као:

$$\sigma_{ij} C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

Ако је тензор напрезања изражен према Војтовој конвенцији, која дефинише редослед тензора напрезања и помоћу коришћења особине симетрије тензора добија се:

$$\sigma_{ij} = \{\sigma_{11}\sigma_{22}\sigma_{33}\sigma_{23}\sigma_{13}\sigma_{12}\}^T$$

и тензор деформације

односно:

$$\varepsilon_{kl} = \{\varepsilon_{11}\varepsilon_{22}\varepsilon_{33}\varepsilon_{23}\varepsilon_{13}\varepsilon_{12}\}^T$$

У том случају се тензор деформисања не изражава помоћу тензорских већ инжењерских компоненти, па се у складу са тим уместо $\varepsilon_{12,13,\dots}$ користе компоненте угаоне деформације $\gamma_{12,13,\dots}$. Одатле следи да је:

$$\varepsilon_j = \{\varepsilon_{11}\varepsilon_{22}\varepsilon_{33}\gamma_{23}\gamma_{13}\gamma_{12}\}^T = \{\varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4\varepsilon_5\varepsilon_6\}^T$$

Ова једначина у скраћеном облику, која се и начешће користи је:

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j$$

Анализирањем ове једначине може се уочити да компоненте тензора еластичности C_{ij} ($j=4,5,6$), $\frac{1}{2}$ одговарајућих компоненти истог тензора када је изражен C_{ijkl} , који представља израз тензора четвртог реда (садржи 81 компоненту, јер тензор n реда има 3^n компоненти). Ипак, због симетрије тензора деформисања следи да је:

$$C_{ijkl} = C_{ijlk}$$

На тај начин се две константе ε_{kl} и ε_{lk} могу представити једном константом, чиме је се број материјалних константи смањује на 54. Касније, због симетрије тензора напрезања следи да је:

$$C_{ijkl} = C_{jikl}$$

Тиме се број константи, због симетрије, смањује на на коначних 21, што је максимални број материјалних константи које описују понашање еластичног (анизотропног), материјала.

Тензор еластичности има одређена својства:

- тензор је позитивно дефинисан;
- тензор је симетричан;
- сви дијагонални елементи су позитивни;
- постоји инверзни тензор који се назива тензором осетљивости и који је такође позитивно дефинисан и симетричан.

8.1 Микромеханика композитних материјала.

Основни циљ микромеханике је одређивање механичких особина једног слоја композитног материјала на основу познавања механичких карактеристика матрице и влакана који се користе као ојачање за дати материјал. Постоје више метода микромеханике, а то су (Tsai 1992):

- правило мешавина(*rule of mixtures*);
- метода концентричних цилиндара;
- модел квадратног постављања влакана;
- метода *SCF (Self Consistent Field Methods)* и
- Halpin-Tsai једначина за композите ојачане влакнима.

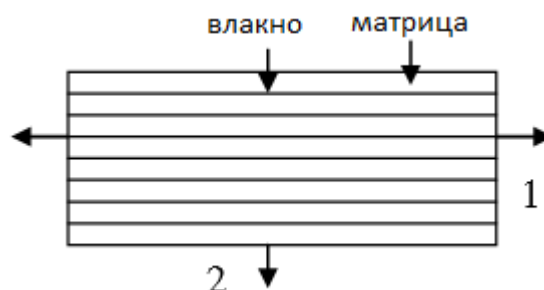
Од свих поменутих метода у пракси се највише користе методе правила мешавина и Halpin-Tsai једначина (Mazen 2006).

8.1.1 Правило мешавина

Основне претпоставке коришћене за методе правила мешавина, и Halpin-Tsai једначине засноване су на микромеханичким карактеристикама као што су:

- веза између влакана и матрице је идеална – матрица и влакна су линеарно еластична, изотропна и хомогена, влакна су идеално распоређена унутар матрице и везивање матрице и влакана је такође идеално
- нема шупљина у композитном материјалу
- не узимају се у обзир ефекти као што су концентрација напрезања итд.

Према правилу мешавина два модула еластичности се могу издвојити E_1 и E_2 . Правци 1 и 2 представљају смерове оптерећења на и управно на правце влакана (слика 39).



Слика 39. Оријентација влакана и матрице

Први модул еластичности E_1 је представљен као (Mazen 2006):

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m$$

Издржљивост једносмерног композита – σ_c , може се добити према једначини:

где су : σ_c – граница лома карбонских влакана, σ_f – напон лома влакана, V_f – запремина влакна и σ_m – напон пуцања матрице.

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f)$$

Ова једначина је заснована на претпоставици да је материјал није изложен сталном истезању. Према овој једначини не узима се у обзир интеракција између влакана и матрице. Дакле, свака компонента композитног материјала својим капацитетом доприноси чврстоћи композита, па се ова карактеристика узима као горња граница издрживости материјала.

Други модул еластичности E_2 према правилу мешавина, је дат за случај када оптерећење делује управно на правац влакана. Добијање модула еластичности E_2 узима у обзир претпоставку да је материјал изложен сталном истезању. Односно $\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m$.

Међутим, ниједна веродостојна претпоставка или бојашњење није споменуто у вези са односом између напрезања у влакнима и матрице у правцу 2 (слика 39.).

Модул E_2 је изражен релацијом (Mazen 2006):

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{V_m E_f + V_f E_m}$$

при чему су: E_f – уздужни модул еластичности композита, E_m – уздужни модул еластичности матрице, V_m – запремина матрице и V_f – запремина влакана.

Правило мешавина се такође може користити за процену особина композита ојачаних хибридниим влакнима одн. влакнима од различитих материјала.

8.1.2 Halpin-Tsai једначина

Ова једначина је емпиријска и даје сасвим задовољавајућу апроксимацију сложених резултата микромеханике, посебно код малог волумена влакана где се показала као прилично тачна. Она је такође корисна код композитних материјала који садрже дисконтинуирана валка оријентисана у правцу оптерећења.

Halpin-Tsai једначина се може изразити као (Mazen 2006):

$$M/M_m = (1 + \xi \eta V_f) / (1 - \eta V_f)$$

где је :

$$\eta = \frac{(M_f/M_m) - 1}{(M_f/M_m) + \xi}$$

У овом случају вредност M представља различите композитне модуле као што су E11, E22, G12 итд. M_f M_m представља одговарајући модул влакана и матрице. V_f представља запремину влакана, ξ је мера ојачања композитног материјала која зависи од геометрије влакана, геометрије слагања унутар матрице и услова оптерећења. Термин ξ је емпиријски фактор који се користи у једначини, а доказан је експерименталним путем. Функција η је конструисана тако да када је: $V_f = 0$, $M = M_m$ и када је: $V_f = 1$, $M = M_f$ онда је за $\xi \rightarrow 0$

$$\frac{1}{M} = \frac{V_m}{M_m} + \frac{V_f}{M_f}$$

Ова једначина даје слабију везу између влакана и матрице док је једначина:

$$\xi \rightarrow \infty: M = M_f V_f + M_m V_m$$

добро позната као правило мешања и даје чвршћу везу.

8.2 Основе макромеханике композитних материјала

Сврха проучавања макромеханике композитних материјала стицање увида у понашање композитног материјала приликом дејства одређених сила на основу познавања појединачних слојева материјала, њихову дебљину, усмерност влакана итд. На основу ових карактеристика композита утврђују се вредности тензора напрезања и деформације у слојевима, на основу којих се касније могу одредити вредности сила и момената за дати материјал.

Основни израз еластичности за дводимензионални облик је исказан као (Mazen 2006):

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)\end{aligned}$$

У математичкој анализи користећи извод, овај израз се може записати као:

$$\varepsilon_{11} = u_{1,1}$$

$$\varepsilon_{22} = u_{2,2}$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{2}(u_{1,2} + u_{2,1})$$

или користећи општи запис:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl}$$

Једначина конститутивности у најопштијем облику може се исказати као:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$$

У скраћеном облику ове матрице се могу записати као:

$$\sigma_{ij} = \sigma_m$$

$$C_{ijkl} = C_{mn}$$

$$\varepsilon_{kl} = \varepsilon_n$$

Према Војтовој нотацији скраћени запис тензорских компоненти напрезања може се исказати као:

$$\sigma_m = C_{mn}\varepsilon_n$$

У табели 3. приказана је промена индекса за ij , kl и m и n

Ij или kl	11	22	33	23	31	12
m или n	1	2	3	4	5	6

8.2.1 Анализа слојевитих композита – дефинисање сила и момената

Приликом анализе вишеслојних композитних материјала односно ламината, треба узети у обзир основне претпоставке на основу којих се могу дефинисати напрезања, деформисање као и силе које и моменте који делују на материјал.

Основне претпоставке које се користе за извођење теорије ламината су следеће:

- ламинат је у стању површинског напрезања
- не постоји клизање између слојева
- правац деловања силе чини нормала која остаје управна на раван ламината током деформације што доводи до $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$
- помаци у равни материјала је исказана линеарном функцијом z , према Кирхфовој претпоставци.

Основна претпоставка *Кирхгофове теорије плоча* је да тачке плоче на управној линији $\perp$ на средњу површину остају и после деформације плоче на правој линији и управно на деформисану срећу површ. што за последицу има да су клизања γ_{xz} и γ_{yz} једнака нули, као што је већ поменуто.

Према томе, ако су компоненте тензора дефинисане као (Mazen 2006):

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \gamma_{xz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\end{aligned}$$

из чега следи према Кирхофовој претпоставци:

$$\begin{aligned}u &= u_0(x, y) + zF_1(x, y) \\ v &= u_0(x, y) + zF_2(x, y)\end{aligned}$$

8.3 Критеријуми попуштања композитних материјала

У односу на материјале који су по својим својствима изотропни, у случају композитних материјала, механизми који доводе до попуштања материјала или чак лома, знатно се разликују од изотропних материјала, па се према томе не могу описати класичним приступом као крти или дуктилни лом. Основни разлог за то је састав композитних материјала који су састављени од великог броја слојев код којих чак ни појединачни слој није хомоген, јер се састоји од минимум две компоненте: матрице и ојачања. Због тога је у самом почетку разматрања, јасно да до попуштања композитних материјала може доћи на различите начине. У пракси се најчешће разматрају последице деловања спољашњих фактора као што су:

- лом матрице
- пуцање влакана унутар матрице
- ивлачење влакана
- деламинација, оди одвајање слојева – која је карактеристична код ваздухопловних конструкција.

Временом је развијен велики број критеријума попуштања, од којих су неки мање а неки више прихваћени у пракси. Неки од најпознатијих и највише прихваћених критеријума су:

- *Tsai-Hill* критеријум

- *Tsai-Wu* критеријум
- *Hashin-ов* критеријум итд.

Критеријуми се постављају за један слој композитног материјала, док су напрезања дефинисана координатним системом, па је према томе потребно познавати пет параметара чврстоће а то су (Mazen 2006):

- X_t – затезна чврстоћа у смеру влакана;
- X_c – притисна чврстоћа у смеру влакана;
- Y_t – затезна чврстоћа управно на смер влакана;
- Y_c – притисна чврстоћа управно на смер влакана и
- S – отпорност на смицање

Као што је већ поменуто постоји јако велики број критеријума попуштања композитних материјала, али се у најчешће користе ова три поменута критеријума, па ће оно бити највише разматрани у даљем тексту.

8.3.1 *Tsai-Hill* критеријум попуштања

Овај критеријум се најчешће користи код двоосног напрезања материјала, и поставља се за један слој у површинском стању напрезања. До попуштања композитног материјала неће доћи, ако је овај критеријум задовољен, што се може изразити као (Mazen 2006):

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} < 1$$

8.3.2 *Tsai-Wu* критеријум попуштања

Tsai-Wu критеријум, је једна од највише коришћених критеријума у пракси. До попуштања материјала неће доћи уколико је испуњен критеријум (Mazen 2006):

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1$$

при чему је:

$$F_1 = \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c}$$

$$F_2 = \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c}$$

$$F_{11} = \frac{1}{X_t X_c}$$

$$F_{66} = \frac{1}{S^2}$$

$$F_{12} = -\sqrt{F_{11}F_{22}}$$

8.3.3 Hashin-ов критеријум попуштања

Код овог критеријума, за разлику од *Tsai-Hill* и *Tsai-Wu* критеријума, разликује се попуштање влакана и попуштање матрице, па се ове две компоненте разматрају одвојено. Овај критеријум се обично користи у стању двоосног напрезања материјала, а заснива се на следећим претпоставкама (Mazen 2006):

- до попуштања долази у матрици или влакнима, па је почетак напрслине у материјалу микромеханички феномен;
- композитни материјал има једнаке особине у свакој тачки и
- постоје само површинска напрезања која доводе до попуштања композитног материјала.

Овај критеријум се описују следећи изрази (Mazen 2006):

1. Попуштање влакана услед затезног напрезања према $\sigma_{11} > 0$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_t^2}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 < 1$$

2. Попуштање влакана услед деловања притиска према $\sigma_{11} < 0$

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t^2}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 < 1$$

3. Попуштање матрице због деловања затезног напрезања према $\sigma_{22} > 0$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_c^2}\right)^2 < 1$$

4. Попуштање матрице због деловања притиска према $\sigma_{22} < 0$

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{2S_{23}}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_{23}}\right)^2 - 1\right]\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 < 1$$

10. Закључак

Композитни материјали покривају широк спектар материјала који су добијени комбинацијом две или више компоненти. Најчешће су то материјали које чини матрица (по правилу еластична), и ојачање које поседује извесну затезну чврстоћу, па је најчешће мање еластично у односу на матрицу.

Материјали који се користе у процесу производње композитних материјала варирају како по физичким, механичким и другим својствима, тако и према хемијским. Ово се првенствено односи на материјале за израду матрица које варирају од полимерних, металних, керемичких итд. Влакна или честице којима се матрице ојачавају такође варирају у складу са већ поменутиим особинама.

Поједини композитни материјали због својих физичких, хемијских, механичких и других особина у овом тренутку представљају незаменљива средства за изградњу сложених ваздухопловних, аеронаутичких и других конструкција. Међутим, поједини композити још увек нису заступљени у ширем контексту масовне производње првенствено због цена материјала и релативно сложених процеса производње.

Механичке особине композитних материјала могу се симулирати различитим математичким моделима, али се у пракси све више користи експериментални приступ анализи комбинације одређених матрица и ојачања, која чини композитни материјал.

Како су композитни материјали највише заступљени у војном и цивилном ваздухопловству, о чему говори велики број различитих аутора, највећи број савремених истраживања и технологија се употребљава управо у те сврхе.

Тема изучавања композитних материја и њихове употребе у сложеним конструкцијама обухвата велики број научних грана из области, механике, физике, хемије, као и аеродинамике ако се узме у обзир да струјања ваздуха око аеродинамички обликованих тела (као што је крило авиона), изазива одређена напрезања. Према томе, тема се може и даље истраживати ако би се нпр. на основу тродимензионалног модела авионског крила, и његове конструкције коју претежно чине композитни материјали и ламинати, применио модел коначних елемената што би омогућило симулацију реалних услова у којима се тако аеродинамички обликован модел налази. Наравно, иста методологија се може применити и код других сложених конструкција, пре самог пројектовања

11. Референце

1. Д. Адамовић, М. Јовановић, В. Лазић, Н. Ратковић (2003): *Машински материјали*, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац
2. Akovali, G.(2001): *Handbook of Composite Fabrication*, RAPRA Technology LTD.,Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, UK,
3. F.Hussain, M. Hojjati, M. Okamoto, R. Gorga (2006): *Polymermatrix: Prcesing, Manufacturing and Application*, Review Papers
4. Д.Ђорић, Т.Филетин., (2010): *Материјали у зракопловству*, Факултет стројарства и бродоградње Свеучилиште у Загребу, Загреб.
5. J. Sloan,. (2019):*Park Aerospace's epoxy, cyanate ester resins target advanced radome applications*, CompsiteWorld,
<https://www.compositesworld.com/products/park-aerospaces-epoxy-cyanate-ester-resins-target-advanced-radome-applications> посећено 22.12.2018
6. G. Gardiner,. (2018):*PEEK or PEKK in future TPC aerostructures*, CompositeWorld <https://www.compositesworld.com/articles/peek-or-pekkin-future-tpc-aerostructures> посећено 22.12.2018
7. A.T. DiBendetto (2001): *Materials sience & Engeneering: Tailoring of interfaces in glass figer reinforced composites*, Department of Chemical Engineering and Institute of Materials Science, University of Connecticut, Storrs, CT 06269, USA
8. P. Berlin., Alexander, (2014): *Mechanism OF ARAMIDE FIBRES IN UNIDIRECTIONAL POLYMER composites under extension*. p2. 10.13140/2.1.2688.4487.
9. X. Huang (2009): *Fabrication and properties of Carbon Fibers*,Chemical Sciences & Materials Systems Laboratory, General Motors Research & DevelopmentCenter,MI 48090-9055, USA
10. H. Herring., (1966): *Selected mechanical and phisical properties of boron filaments*, Langly Research Center, National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC.
11. H. Spilker. (2018): *HI-NICALON ceramic fiber*, COI Ceramics, Inc, Utah 84044.

12. MachineDesign, *The Future of Metal Is in Matrix Composites*, retrived from: <https://www.machinedesign.com/materials/future-metal-matrix-composites> 25. 12 .2018
13. S.Mirle. (2003). Aluminium Matrix Composites: *Challenges and Opportunities*. Sadhana.
14. Jayappa, Satish & Satish, K.G.. (2018):*Preparation of magnesium metal matrix composites by powder metallurgy process*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
15. H. Attar.,S. Ethem-Haghighi., D. Kent., M. Dargusch (2018):*Recent developments and opportunities in additive manufacturing of titanium-based matrix composite*,International Journal of Machine Tools and Manufacture p.85-102
16. K.Baczewska-Joanna. (2016). Copper Metal Matrix Composites Reinforced by Titanium Nitride Particles. Key Engineering Materials.
17. S. Tamer (2011).Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods,Materials & Design.
18. A. A. Mazen ., M. Abdel Ghafaar., (2006): *APPLICATION OF THE RULE OF MIXTURES AND HALPIN-TSAI EQUATIONS TO WOVEN FABRIC REINFORCED EPOXY COMPOSITES*, Design and Production Engineering Department, Faculty of Engineering, Minia University, Minia, Egypt.
19. Uskoković P., Aleksić R., (2005), *Optička vlakna kao senzori za detekciju mehaničkogoštećenja u kompozitnim materijalima*, Tehnološko-Metalurški fakultet, Beograd.
20. Annual book of ASTM Standards (1999), Vol.15.03, American Society for Testing andMaterials, Philadelphia, PA.