



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Примењена механика и аутоматско управљање

Предмет: Влакнима ојачани материјали

Број индекса: 704/2017

Александар Б. Васиљевић

**Фабрикација и примена влакнима
ојачаних материјала**

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

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

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

проучи обимну литературу која се тиче нових влакнима ојачаних материјала. Посебан осврт треба ставити на начине фабрикације ових материјала, са свим специфичностима у изради. Од кандидата се такође очекује да проучи начине примене влакнима ојачаних материјала, са евентуалним предлогом примене ових материјала у постојећим конструкцијама.

Препоручена литература:

[1] Д. Адамовић, М. Јовановић, Б. Лазић, Н. Ратковић (2003): *Машински материјали*, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац.

[2] Др. Момчило Стевановић (2002): *Влакнима ојачани полимерни композити: компоненте, структура, испитивање*, Партенон, Нови Београд.

[3] Akovali G. (2001): *Handbook of Composite Fabrications*, RAPRA Technology LTD., Shawbury, Shrewsbury, Review Papers.

[4] Г.Богдановић (2011): *Динамичко понашање композитних ламината*. Докторска дисертација, Крагујевац: Факултет инжењерских наука.

[5] Д.Чукановић (2017): *Статичка и динамичка анализа плоча од функционално градијентно распоређених материјала*. Докторска дисертација, Крагујевац: Факултет инжењерских наука.

Крагујевац, 2020.

Ментор:

Др Гордана Богдановић, ванредни професор

Садржај

1. Увод.....	1
2. Карактеристике и поделе композитних материјала.....	2
3. Композитни материјали са полимерном матрицом	5
3.1 Матрице.....	6
3.2 Влакна	7
3.2.1 Стаклена Влакна.....	8
3.2.2 Угљенична влакна	11
3.2.3 Арамидна влакна	15
3.2.4 Влакна бора	19
3.2.5 Влакна од Силицијум- Карбида (Керамичка влакна)	21
3.2.6 Метална влакна	22
3.3 Форме Влакана.....	22
4. Поступци производње полимерних композита	25
3.4.1 Поступци у отвореном калупу	25
3.4.1.1 Ручно слагање.....	25
3.4.1.2 Распршивање	26
3.4.1.3 Техника аутоклава	28
3.4.1.4 Намотавање.....	29
3.4.2 Поступци у затвореном калупу	31
3.4.2.1 Вруће пресовање у калупу	31
3.4.2.3 Убризгавање смоле.....	33
3.4.2.4 Пултрузија	33
5. Композитни материјали са металном матрицом (ММС).....	35
5.1 Поступци производње	36
5.1.1 Поступци у течном стању	37
5.1.2 Поступци у чврстом стању.....	40
5.2 Примена композитних материјала са металном матрицом.....	41
6. Композитни материјали са керамичком матрицом	43
6.1 Поступци производње	44
6.1.1 Поступци у чврстом стању.....	44
6.1.2 Сол- Гел поступак	45
6.1.3 Инфилтрација растопа.....	46

6.2 Примена композитних материјала са керамичком матрицом.....	47
7. Ламинирани (слојевити) композитни материјали	48
7.2 Сендвич конструкције	50
8. Закључак.....	53
9. Референце.....	54

Резиме:

Композитни материјали су релативно нова група материјала, чија примена последњих година све више расте. Реч "композит" се односи на нешто што се састоји из више компоненти, тиме и композитни материјали представљају комбинацију два или више материјала који се разликују по хемијским и другим особинама. Композитни материјали се састоје из ојачања и матрице, ојачања се додају да би се повећала чврстоћа и крутост матрице. Коначни материјал, добијен комбинацијом ојачања и матрице поприма особине обе компоненте, чиме се добија материјал са унапређеним карактеристикама, које ниједна компонента не поседује индивидуално.

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

Abstract:

Composite materials are a relatively new group of materials, which application has been growing in recent years. The word "composite" refers to something that consist of multiple components, thus composite materials are a combination of two or more materials that differ in chemical and other properties. Composite materials consist of reinforcement and matrix, reinforcements are added to increase the strength and stiffness of the matrix. The final material, obtained by combination of reinforcement and matrix, takes on the properties of both components, thus obtaining material with improved characteristics, which no component possesses individually.

Key words: *composite materials, fiber-reinforced materials, polymer composites, metal composites, ceramic composites.*

1. Увод

Последњих година дошло је до убрзаног развоја нових материјала, побољшаних карактеристика, композитних материјала. Првенствено развој композитних материјала је започео због потреба војне и ваздухопловне индустрије, али примену налазе и у другим гранама индустрије као што су: аутомобилска индустрија, космонаутика, бродоградња, биомедицинска индустрија итд., односно где год да се јавља потреба за материјалим побољшаних карактеристика, које "традиционални" материјали индивидуално не поседују. Ови материјали имају бројне предности у односу на традиционалне материјале у виду уштеде у маси производа, постизања изванредних карактеристика, могућности добијања сложених облика конструкција, отпорности на корозију, штетне хемијске утицаје, итд.

Иако композитни материјали пружају изванредне карактеристике, какве ниједан материјал индивидуално не поседује, ови материјали ипак нису заступљени у широкој примени, углавном из економских разлога. Композитни материјали налазе примену у конструкцијама чија намена изричито захтева примену овог типа материјала, а то је углавном ваздухопловној индустрији у изради компоненти авиона, космонаутици у изради делова свемирских летелица и мањим делом у аутомобилској индустрији. Али развојем технологије и новим истраживањима на овом пољу ће сигурно довести до веће примене ових материјала.

У овом раду ће бити описане основне карактеристике најчешће коришћених композитних материјала (полимерних, металних, керамичких као и слојевитих композитних материјала), описани назаступљенији начини њихове фабрикације као и дати поједини примери њихове примене.

2. Карактеристике и поделе композитних материјала

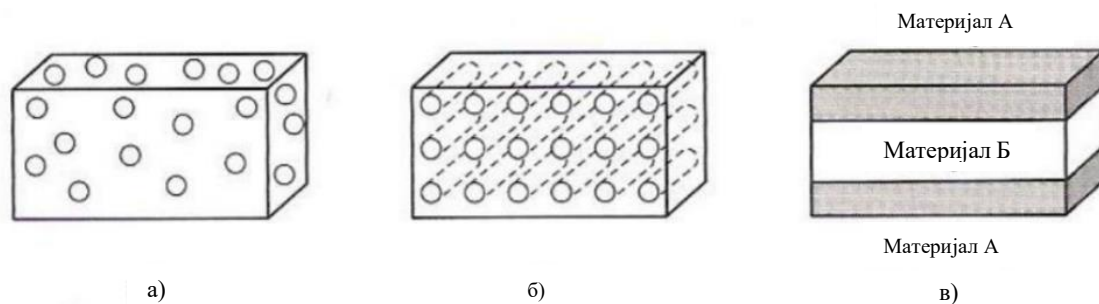
Под називом композити, подразумевају се материјали израђени од две или више компоненти, које се доста разликују како по хемијском саставу тако и по другим особинама. Развој ових материјала произишао је из потребе да се код многих конструкција постигне што већа јачина и крутост, а уз то смањи тежина. [1]

Такође постоје и неки примери материјала који садрже више од једне компоненте у себи, али не спадају у групу композитних материјала као што су: метали и легуре са нежељеним садржајем нечистоћа или са легирајућим елементима, пластика са незнатним садржајем пунилаца, лубрификаната и ултравиолентних апсорбера као и класична керамика. [2]

Сваки композитни материјал се састоји из ојачања и матрице, ојачања се додају да би се повећала чврстоћа и крутост матрице. Због тога су карактеристике композита условљене: својствима материјала матрице и ојачања, величином и распоредом (расподелом) компоненти, запреминским уделом компоненти, облика и распореда компоненти као и природом и јачином веза између матрице и ојачања. [3]

Према врсти ојачања композитни материјали се могу поделити на:

- Честицама ојачане материјале,
- Влакнима ојачане материјале,
- Слојевите односно ламиниране композитне материјале.



Слика 1. Приказ структуре композитних материјала у односу на врсту ојачања коју користе. При чему су: а) честицама ојачани б) влакнима ојачани и в) ламинирани односно слојевити композитни материјали. [3]

Честицама ојачани композитни материјали су ојачани честицама, различитог облика приближних димензија у свим правцима. Један од примера за овај тип композитног материјала је бетон, који је мешавина цемента и шљунка.

Влакнима ојачани композитни материјали представљају групу композитних материјала који су добијени спајањем чврстих, крутих и кртих влакана са меком и пластичном матрицом. Код материјала код којих се користи овај тип ојачања долазе до

изражаја механичке особине као што су побољшање чврстоће, жилавост, крутост материјала као и повећања односа између чврстине и густине.

Влакна у материјалу могу да буду распоређена: **континуирано** и **дисконтинуирано**.

Док облици влакана могу да буду у облику:

- **Вискера-** монокристално влакно пречника од 0,5 до 30mm и дужине до 20mm, веома високе чврстоће, са тачком топљења између 2000 и 4000 °C. Нису заступљени због економских разлога.
- **Влакна-** релативно равномерно распоређена у правцу уздужног пресека материјала и најчешће се користи у облику ткања.
- **Жица-** састоји се од жица које су релативно већег пречника у односу на влакна.

Док су **ламинирани односно слојевити композитни материјали** састављени од слојева (ламина). Слојеви материјала су слагани и међусобно спојени органским лепком. Имају малу масу, добру ударну жилавост као и отпорност на корозију и добре изолационе карактеристике. Пример за овај тип материјала је шперплоча, која је састављена од непарног броја фурнира, сложених тако да дрвена влакна буду оријентисана међусобно под правим углом. Још један пример су и сигурносна стакла, где су два стакла спојена пластичним лепком.

Композитни материјали могу бити и : **изотропни** (исте карактеристике у свим правцима) и **анизотропни** (различите карактеристике у различитим правцима).

Композитни материјали се такође могу поделити и према врсти матрица на: **композите са керамичком матрицом, са композите металном матрицом** (енг. *Metal Matrix Composites-ММС*), **композите са полимерном матрицом** (енг. *Polymer Matrix Composites- РМС*), **композите са угљеничном матрицом** (енг. *Carbon Matrix Composites- СМС*) као и **хибридне композите** (енг. *Hybride Composite Material- HCM*). Композити са угљеничном и металном матрице су предвиђени за конструкције које се користе на високим температурама (<310 °C), где композитни материјали са полимерном матрицом нису применљиви. Такође метални композити се користе у конструкцијама где је потребна електрична и топлотна проводљивост. [4]

Металне и полимерне матрице се израђују да би се остварила тражена дуктилност (способност материјала да се под утицајем напрезања пластично деформише, односно истеже пре него што дође до лома материјала), док се керамичке матрице ојачавају због смањена крутости керамике [3].

По правилу се код металних композита ојачањима смањују трајне деформације при већим температурама, док се код полимерних композита повећава чврстоћа и крутост.

Матрица заузима око 30-40% масе композитног материјала и неке од карактеристика које матрица мора да испуни су да [4]:

- везује компоненте композита у једну целину, и да задржава механичка и температурна својства.
- штити ојачања од замора, хабања као и спољашњих утицаја.
- равномерно преноси оптерећења на ојачања која делују на материјал.
- буде издржљива, чврста и да пружи композиту одговарајућу смицајну чврстоћу, отпорност на притисак и попречна оптерећења.
- одржава одговарајући распоред и правац ојачања у материјалу.

Матрица композитног материјала такође мора да формира и облик завршне конструкције и сам процес израде композита у великој мери зависи од врсте материјала матрице.

Матрице су углавном раствори који могу бити течни као што су код полимерних композита или метални раствори код металних композита.

Механичке карактеристике материјала који се користе у изради матрица су приказани у табели 1.

Табела 1. Механичке карактеристике материјала матрица.[5]

Својства	Метали	Полимери	Керамика
Густина(Mgm^{-3})	2-16	1-2	2-17
Топљење ($^{\circ}\text{C}$)	200-3500	70-200	2000-4000
Топлотна проводљивост	висока	ниска	средња
Топлотна растезљивост	средња	висока	ниска
Специфични топлотни капацитет	низак	средњи	висок
Електрична проводљивост	висока	врло ниска	врло ниска
Затезна чврстоћа (MPa)	100-2500	30-300	10-400
Модул еластичности (GPa)	40-400	0,7-3,5	150-450
Тврдоћа	средња	ниска	висока
Отпорност на корозију	средња-слаба	добра-средња	добра

Карактеристике материјала матрице које она поседује су од велике важности за будућу конструкцију. Матрица је постављена тако да буде прва изложена утицајима у околине, као што су влага или различите врсте штетних утицаја. У неким конструкцијама она мора да буде отпорна на погонско гориво, хидрауличне течности и да подноси високе температуре које некада пређу и више од 200 $^{\circ}\text{C}$.

Композитни материјали налазе у примену у великом броју области као што су: индустрија аутомобила, авио индустрија, за израду спортске опреме, кућних уређаја, итд. Њихова употреба константно расте, јер лако могу да замене неке од већ коришћених материјала као што су алуминијум или челик и да уједно постигну много боље карактеристике.

У односу на "традиционалне" материјале композитни материјали поседују бројне предности [3]:

- отпорност на корозију
- мала густина и маса
- повољан однос чврстоће и густине (специфична чврстоћа)
- повољан однос модула еластичности у густине (специфична крутост)
- могућност производње делова сложеног облика
- једноставно и јефтино одржавање
- дужи радни век
- могућност "дизајнирања" карактеристика

3. Композитни материјали са полимерном матрицом

Композитни материјали са полимерном матрицом су најразвијенија и највише коришћена група композитних материјала, због великих могућности примене и фабрикације, ниске цене и добрих механичких способности које доносе са собом. Још једна од њихових добрих особина су и могућност креирања сложених и комплексних конструкција, због структуре материјала од којих се израђује матрица.

Један од многобројних примера примене композита са полимерном матрицом је и у ваздухопловној индустрији, тачније за израду авиона. У табели 2. је приказана маса полимерних композита коришћених у изради појединих авиона, као и остварено смањење масе у конструкцији у односу на традиционалне материјале.

Табела 2. Примена полимерних композитних материјала у изради појединих типова авиона. [3]

Тип авиона	Укупна маса полимерних композитних материјала, kg	Уштеда масе, kg
Boeing 737	681	272
Boeing 757	1516	676
Boeing 767	1535	636

Композитни делови су по правилу 20% до 30% лакши у односу на исте металне делове. Захваљујући употреби композитног материјала у овим конструкцијама довело до

смањења масе авиона, а са тим и мање потрошње горива, чиме је дошло до економске уштеде.

3.1 Матрице

Композити са полимерном матрицом се састоје од полимерне смоле као матрице и влакана као ојачања. Углавном садрже релативно чврста, крута влакна у дуктилној маси, односно жилавој матрици.

Материјали полимерних матрица су дуктилни и жилави, да би равномерно преносили оптерећење са матрице на ојачања, као и да би спречили ширење пукотина између прекинутих влакана да се шире кроз цео композит. Матрица мора да буде и чврста и жилава да би допринела укупној чврстоћи композита [3].

У односу на степен утицаја температуре на матрицу, полимерне матрице се деле на [3]:

- **Пластомерне-** код којих долази до промене услед деловања високих температура.
- **Дуромерне-** код којих не долази до промена услед деловања температура.

Дуромерне матрице- се користе за захтевније конструкције, израђују се углавном од епоксидних смола које су отпорније на влагу и имају боље механичке карактеристике у односу на пластомерне. Облик дуомерних композита није могуће променити повећањем температуре као код пластомерних, који омекшавају при већим температурама.

Дуромерне матрице су углавном изграђене од: незасићених полиестера, епоксидних смола и полиимида. [4]

Полиестери се користе као матрица у комбинацији са стакленим влакнима, јефтини су, мале густине, отпорни на спољашње утицаје и температуре до 100 °C. Они су најраспрострањенија врста дуомерних матрица и користе се у ауто-индустрији. Епоксидне смоле су скупље од полиестерских али зато имају боља механичка својства, стабилност, и компатибилније су са више врста ојачања и имају бољу отпорност на влагу. Могу да се користе на мало већим температурама од 175 °C. Полиимиди имају примену и на високим температурама која износи око 300 °C, али је њихова прерада сложена. [4]

Један од примера примене овог типа композитног материјала, је композит на бази цианинтне смоле са називом *HTM143*, који се користи за израду вештачких сателита. Матрица израђена од овог типа материјала има добре механичке особине, затезну чврстоћу и предвиђена је за рад на високим температурама.

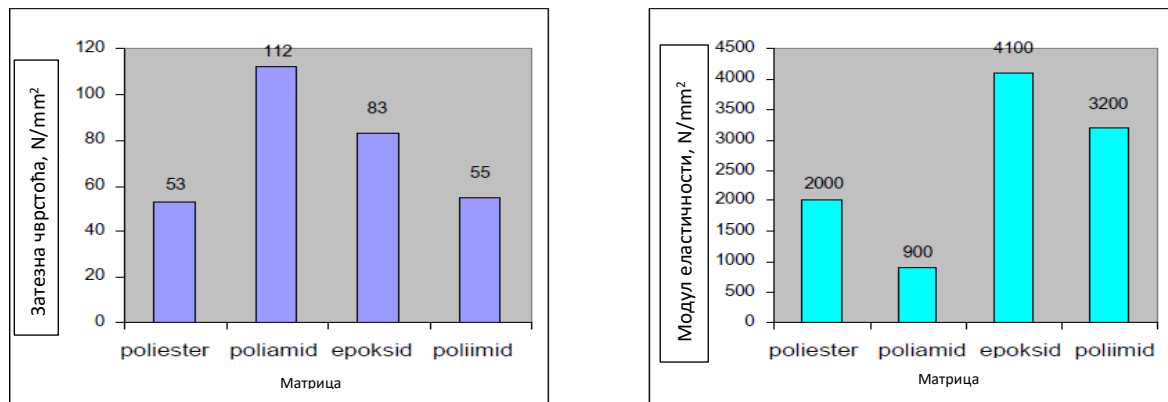
Пластомерне матрице- за разлику од дуомерних матрица, пластомерне матрице поновним загревањем омекшавају, па је могуће накнадно обликовање и дорада. Развојем технологије довело је до неких пластомерних матрица које могу да поднесу и

веће температуре до 300 °C, чиме пластомерне матрице представљају квалитетну замену у односу на дуромерне.

Материјали који се углавном користе за израду полимерних матрица су : полиолефини (полиетилен, полипропилен), винил полимери (поливинил хлорид- PVC), полиамиди (РА), полиацетали, полифенилени (полифенилен сулфид- PPS), полисилфони и поли-етер-етер-кетон (РЕЕК). [4]

Такође код пластомерних материјала је могућа одређена кристалност док су дуромерни материјали искључиво аморфни. Кристалност је последица усмерености кристалних ланаца. Они пластомери који имају кристалу структуру имају већу густину, отпорнији су на хемијске утицаје за разлику од дуромера. Такође дуромери су подложнији утицају растварача, па са тим осетљиви на трење и замор.

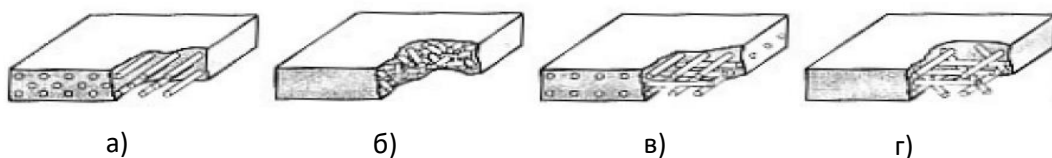
На слици 3. је приказан графички приказ разлике у механичким карактеристикама код различитих типова матрица.



Слика 2. Графички приказ затезне чврстоће и модула еластичности код различитих типова матрица. [3]

3.2 Влакна

Влакна се додају полимерним композитима да би се повећала чврстоћа композита, за улогу још имају и да преносе оптерећење које делује на материјал. Потребно је да влакна буду што крућа и што мање масе да би ефикасније поднела оптерећења. Укупан део влакана углавном износи до 70% од укупне запремине материјала. Постоји више типова распореда влакана у матрици, који су приказани на слици 3.

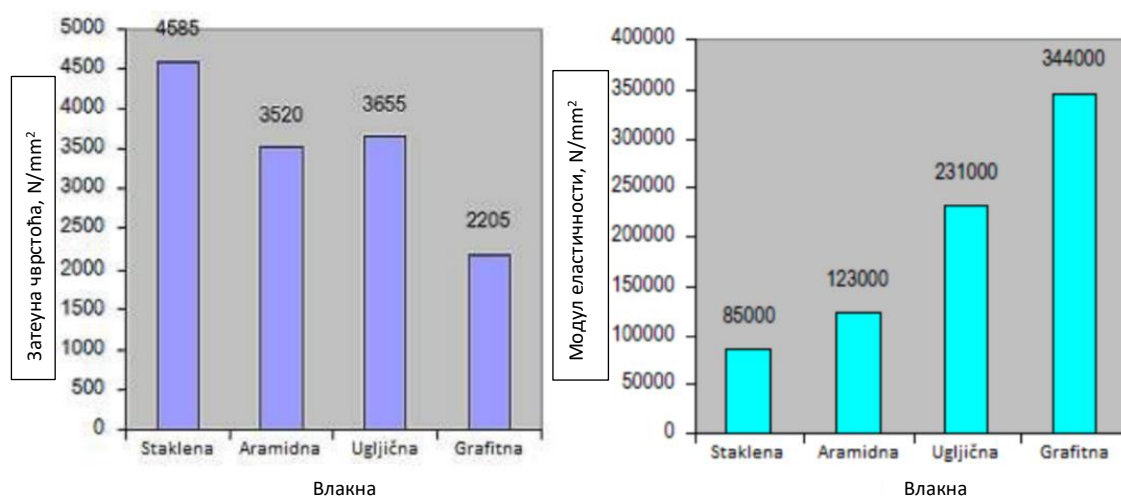


Слика 3. Различити типови распореда влакана, при чему су: а) континуирана једносмерна влакна, б) насумично распоређена дисконтинуирана влакна, в) ортогонално распоређена влакна, г) влакна распоређена у више праваца [3]

Повећавањем преноса оптерећења са матрице на влакна уједно се и повећава чврстоћа композита. Битно је да маса влакана буде што мања да би били чвршћи и тиме ефикасније поднели оптерећења. Због тога је за израду влакана потребно користити материјале високе специфичне чврстоће и високе крутости.

Влакна која се користе код полимерних композита су углавном стаклена, угљенична и арамидна односно кевлар. Осим ових могу да се користе још и влакна на бази бора, силицијум-карбида или алуминијум-оксида.

На слици 4. је приказан графички приказ разлике у механичким карактеристикама код различитих врста влакана.



Слика 4. Графички приказ затезне чврстоће и модула еластичности код различитих врста влакана. [3]

3.2.1 Стаклена Влакна

Стаклена влакна (слика 6.) су бела или провидна, компатибилна су са великим бројем типова матрица и са полимерном матрицом граде композите високе специфичне чврстоће. Њих карактерише велика чврстоћа, али нису довољно крута да би се користила као ојачања код неких носећих конструкција. Такође нису отпорна на високе температуре, па се могу користити само у подручјима која нису изложена високим температурама до 200 °C, али у комбинацији са полиимидним матрицама могу да поднесу температуре и до 300 °C.

Постоји 4 групе стаклених влакана (А,Ц,Е,С), као ојачање највише се користи Е стакло које је отпорно на хемијске утицаје и влагу. С стакло је знатно чвршће од осталих типова стаклених влакана. Док је А стакло једно од првих произведених влакана и данас се ретко користи.

Израда стаклених влакана је поприлично једноставна. Стаклена влакна се најчешће производе од силицијума (силицијум-диоксида SiO_2) и имају слабије механичке особине од осталих типова влакана.

Да би се стаклена влакна произвела, прво се стакло на бази силицијума загрева до топљења након тога се истопљена маса провлачи кроз ситне отворе у алатима од платине, где се добијају веома танке нити. Пречници влакана се крећу у редовима микрометара, од $3\mu\text{m}$ до $20\mu\text{m}$. Добијена стаклена влакна се углавном намотавају у снопове (слика 5.), па у зависности од потребе касније различитим методама се стварају траке или тканине већих површина.



Слика 5. Стаклена влакна. [7]

Други начин производње стаклених влакана је обликовање куглица од истопљене масе, пречника 2cm до 3cm. Овако добијене се куглице се лакше складиште и транспортују, и при њиховој употреби, куглице се поново загревају и провлаче кроз ситне отворе исто као у првом примеру.

Један од многобројних примера коришћења полимерних композита ојачаних стакленим влакнима је у авио индустрији, где се користе за израду кутије мотора, носачима за пртљаг, кућишта антена и електричних компоненти. Такође се користе и у аутомобилској индустрији као и у индустрији бродова и пловила, кућним уређајима, медицини.

Будући да се коришћењем оваквих материјала смањује маса конструкције, они су погодни за велике конструкције као што су ветрењаче.

Ветрењаче израђене од овог типа материјала омогућавају високу чврстоћу али малу масу, и тиме се повећава ширина распона крила ветрењаче, која доводи до већег искоришћења енергије ветра.

Коришћењем полимерних композита ојачаних стакленим влакнима, ширина распона крила ветрењаче може да достигне и до 80m и погодне су за коришћење у различитим срединама и климатским условима, небитно да се ради о копну или на површини мора (слика 6.)



Слика 6. Примена полимерних композитних материјала ојачаних стакленим влакнима у конструкцији ветрењача. [8]

Ови композитни материјали такође налазе и примену у изради подземних цеви, које веома лако замењују старе материјале као што је челик или неке од легура метала. Разлог томе је отпорност на корозију као и радни век који може да премаши и више од 30 година [9].

Пример таквих цеви је приказан на слици 7.



Слика 7. Цеви изграђене да полимерних композитних материјала ојачаних стакленим влакнима. [9]

3.2.2 Угљенична влакна

Угљенична (карбон) влакна су достигла популарност 50-их година прошлог века и од тада су у сталном порасту. Популарна су код механички најоптерећенијих ваздухопловних конструкција, због велике чврстоће и мале тежине. Такође имају и високи модул еластичности и крутост. Угљенична влакна задржавају високи модул еластичности и високу чврстоћу и на високим температурама, отпорна су на влагу, већину хемијских растварача, киселине.

Угљенична влакна садрже око 93-95% угљеника- C, док графитна влакна садрже око 99% угљеника. Такође је погрешно називати угљенична влакна графитним, јер графитна влакна садрже већи проценат угљеника. Као и зато што се графитна влакна добијају на много већим температурама (1900 до 2500 °C), док се угљенична влакна добијају поступком карбонизације из различитих смола и полиакрилонитилних (PAN) влакана на температурама између 1200 и 1400 °C. [4]

Према крутости угљенична влакна се могу поделити у четири групе и то (3):

- Стандардног модула еластичности- 220 GPa
- Средњег или прелазног модула еластичности- 240 GPa
- Високог модула еластичности- 300 GPa
- Ултрависоког модула еластичности- 340 GPa

Карбонска влакна се добијају поступком карбонизације из различитих смола или полиакрилонитилина (PAN). Влакна која се добијају из смоле карактерише виши модул еластичности али и нижа затезна чврстоћа у односу на PAN влакна. Такође поменута влакна имају и бољу електричну проводљивост и већег су пречника у односу на PAN влакна, 10-11 μ m, док су PAN влакна од 5 μ m до 10 μ m.

Добијање угљеничних влакана је компликован процес, који укључује и механичке и хемијске процесе. Добијање угљеничних влакана започиње са органским полимерима, односно прекурсорима, у 90% случајева тај прекурсор је полиакрилонитрил (PAN). Органски полимери се састоје из дугих ланаца, везаним атомима угљеника. Састав прекурсора може да варира у зависности од произвођача, у прекурсор се убацују разни додаци као што су гасови, течности и друге компоненте које стварају различите карактеристике будућих угљеничних влакана, поменути додаци су строго чувана пословна тајна за већину компанија. Када се постигне жељени састав прекурсора, прекурсор се механички трансформише у дуге нити или влакна и затим загрева на повишеним температурама у инертној атмосфери (пиролиза) да би се постигла карбонизација. Помоћу процеса карбонизације не-угљенични атоми се избацују из ланаца и тиме остављају дуге, чврсто уплетене атоме угљеника, који могу и даље да садрже малу количину не-угљеничних атома.

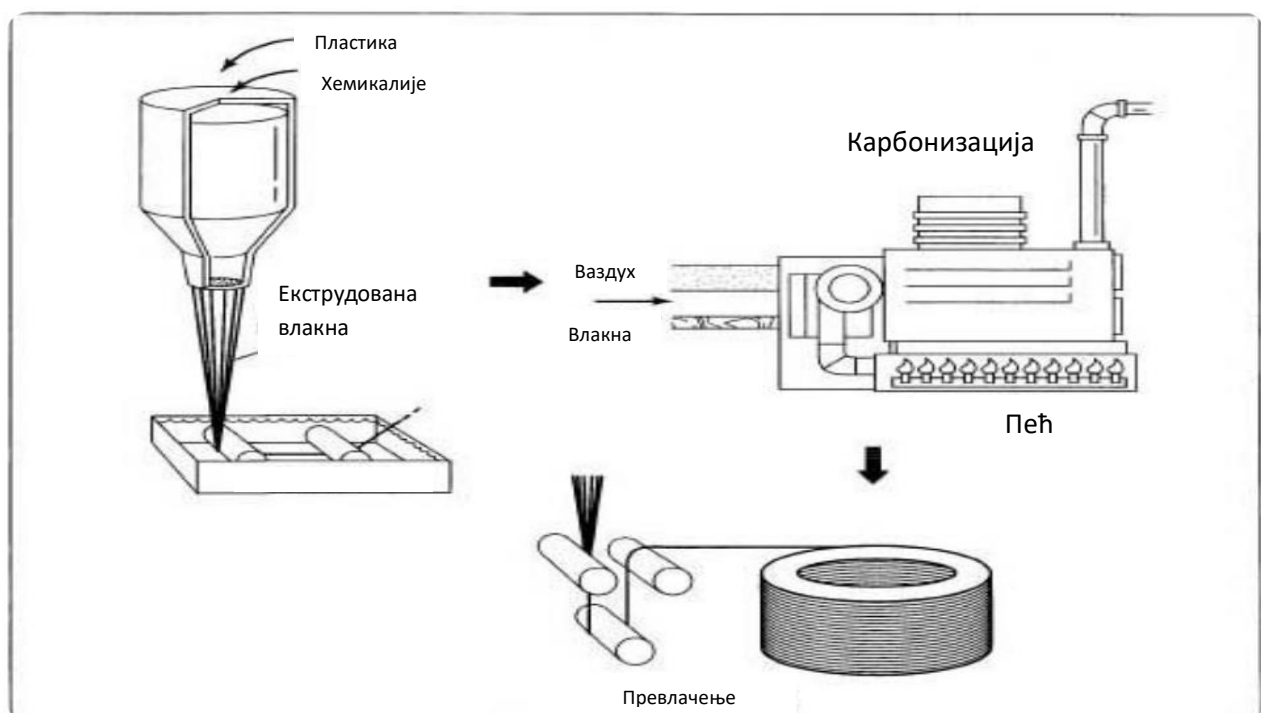
Процес добијања угљеничних влакана добијених карбонизацијом полиакрилонитрила се састоји из пет фаза [10] :

1. **Испредање** (*енг. Spinning*)- Прекурсор се у овом случају добија тако што се акрилонитрилни пластични прах меша са неком другом пластиком као што су метил акрилат или метилметакрилат, који након мешања реагује са катализатором и помоћу процеса полимеризације ствара полиакрилонитрилна пластика. Затим се новодобијена пластика трансформише у влакна, различитим методама. Један начин добијања влакана је тај где се пластика загреје до топлена и након тога пропушта кроз ситне отворе у комору где растварачи испарују, остављајући чврсто полиакрилонитрилно влакно. Такође постоји процес где се уместо загревања, пластика меша са одређеним хемикалијама помоћу којих омекша и даље провлачи кроз отворе као у првом примеру. Након добијених ПАН влакана, она се испирају и развлаче до жељеног пречника влакана.
2. **Стабилизација** (*енг. Stabilizing*)- Пре започињања процеса карбонизације, потребно је влакна хемијски прерадити, где се њихова линеарна атомска структура претвара у неку топлотно стабилнију структуру, у овом случају степенасту атомску везу. Овај процес се постиже загревањем влакана на температури од 200-300 °C, у трајању од 30 до 120 минута. То има за циљ да влакна покупе молекуле кисеоника из ваздуха и помоћу њих преуреде своју атомску везу. Процес стабилизације је компликован и састоји се из неколико поступака, који неки од њих иду истовремено. Такође треба водити рачуна и о топлоти која се ствара због ових реакција да не дође до прегревања влакана. Постоји много врста опреме и технике, помоћу којих се овај процес остварује. У неким случајевима се влакна провлаче кроз велики низ загрејаних комора, у другим случајевима се прелази загрејаним ваљцима преко ваљака. Такође у неким процесима се користи и загрејан ваздух, помешан са различитим врстама гасова који убрзавају хемијску реакцију.
3. **Карбонизација** (*енг. Carbonizing*)- Након процеса стабилизације, влакна се загревају у пећи без присуства кисеоника, до температуре од између 1000-3000 °C у трајању од неколико минута. Недостатак кисеоника спречава влакна да изгоре и атоми у влакнима почињу убрзано вибрирају и избацују већину не-угљеничних атома из свог ланца. Након овога влакно се састоји из дугих, добро затворених ланаца од угљеникових атома и појединих не-угљеничних атома.
4. **Обрада површине** (*енг. Treating the surface*)- Влакна након карбонизације имају површину која не може да оствари добру везу са материјалима матрице. Да би се остварила добра веза између влакана и матрице, површина влакана се благо оксидира. Додавањем кисеоника површина влакана постаје храпавија и тиме добија боље везивне особине. Оксидација се постиже урањањем влакана у различите гасове (ваздух, угљен-диоксид или озон), као и у различите течности (натријум-хипохлорит или азотна киселина). Такође влакна се могу обложити и електролитички. Обрада површине мора да буде строго контролисан процес, да

не би дошло до настанка ситних оштећења као што су ситни отвори по површини, који могу изазвати дефекте влакана.

5. **Премазивање** (енг. *Sizing*)- Након обраде површине влакана, влакна се премазују различитим типовима заштите како не би дошло до њиховог оштећења приликом постављања у матрицу или њиховог ткања. Материјали који се користе за овај процес, морају да буду компатибилни са лепковима који се користе за израду композитних материјала. Влакна могу да буду премазивана епоксидним слојем, полиестерима итд. Након премазивања, влакна се намотавају у снопове од којих касније могу да се израде разна платна у различитим формама, у зависности од форме ојачања.

Скица описаног поступка је приказана на слици 8.



Слика 8. Скица добијања угљеничних влакана карбонизацијом полиакрилонитрилних влакана. [10]

Угљенична влакна се користе где се од конструкције захтева мала тежина, велика крутост, висока кондуктивност, а у неким случајевима примену налазе и због самог изгледа угљеничних влакана.

Угљенична влакна се користе и за израду кућишта ракетних мотора као и разних других апликација у цивилном и војном ваздухопловству.

У авио индустрији се користе јер је тежина конструкције авиона веома битна, јер самњењем масе авиона може доћи до велике уштеде. Баш из тог разлога је авион *Boeing 787 Dreamliner* (слика 9.), био један од најпродаванијих авиона до сада, јер је већи део конструкције авиона изграђен управо од композита ојачаним карбонским влакнима и тиме имао мању масу у односу на претходнике.



Слика 9. Авион Boeing 787 Dreamliner, где је проценат композита у конструкцији 80%. [11]

Такође примену налазе и у спортској опреми где цена није битан фактор да би се оствариле добре перформансе. Користе се за израду рекета за тенис, палица за голф, стрела за стреличарство, опреме за пецање као и још много других примера.

Коришћењем рекета за тенис, ојачаног карбонским влакнима, могу се постићи много боље перформансе са рекетом, као што је јачи удар и тиме лоптица добија већу брзину, као и већу контролу у раду са рекетом, због мале масе. Такође бициклисти користе бицикле и бициклистичку опрему ојачаним овим типом влакана, јер са мањом масом могу достићи већу брзину [12].

У аутомобилској индустрији угљенична влакна се не користе у серијској производњи, због повећања трошкова материјала као и замене већ постојећих алата, јер би употреба ових влакана далеко превазишла новчану добит. Али се зато користе у изради луксузних аутомобила и аутомобила ограничене серије.

Познатији пример коришћења угљеничних влакана у аутомобилској индустрији је у конструкцији формуле 1.

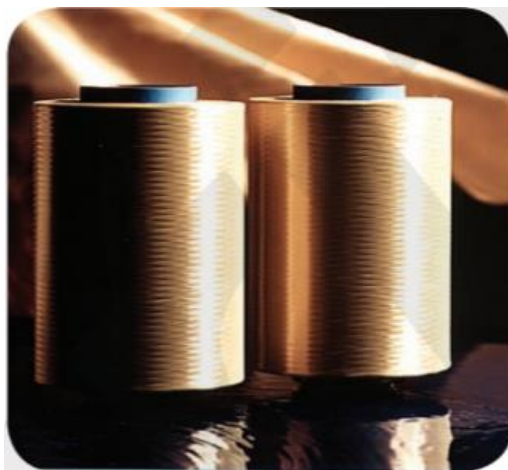
Као што је напоменуто, ова влакна се користе и за израду луксузних аутомобила. Један од примера је новији фордов модел 2020 Ford GT (слика 10). Такође произвођач нуди могућност модела где модел није префарбан, него су угљенична влакна изложена. Ово се често дешава, јер угљенична влакна такође имају модеран и примамљив изглед.



Слика 10. Модел 2020 Ford GT, израђен од угљеничних влакана која су изложена. [13]

3.2.3 Арамидна влакна

Арамидна влакна (слика 11.) спадају у групу влакана која су синтетички створена. Њихова употреба започиње у 60-им годинама прошлог века. Ова влакна су такође познатија и по комерцијалним називима као што су "Kevlar" и "Nomex".



Слика 11. Арамидна влакна. [7]

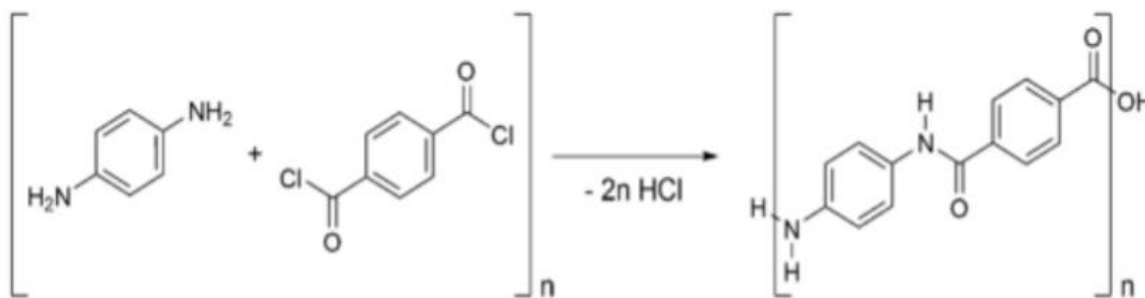
Арамидна влакна су отпорна на удар, замор и трење па се може рећи да су врло крута и жилава. Ова влакна су жуте боје, слабије везивне моћи са матрицом, немагнетна, осетљива на ултраљубичаста зрачења као и на деловање киселина и хемијских растварача. [3]

Ова влакна задржавају механичку отпорност при температурама од $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и стабилна су на већим температурама, иако припадају групи пластомера (ароматични полиамиди).

Постоји више различитих типова арамидних влакана као што су: кевлар 29, кевлар 49 и кевлар 149. У употреби се највише користи кевлар 49. Такође постоји и кевлар 100 који је обојена верзија ових влакана.

Производња арамидних влакана је релативно скуп и сложен хемијски поступак, при коме се анизотропни раствор истискује помоћу млазнице. Да би се започела производња кевлара, прво је потребно створити хемијску супстанцу од које је кевлар израђен, а то је поли-пара-фенилен терефталамид (PPD-T).

Полиамиди као што су кевлар припадају групи полимера, који су добијени реакцијом кондензације између амина (1,4- фенилен-диамин) и киселине на бази хлорида (терефталоил хлорид). На слици 12. је приказана поменута реакција.



Слика 12. Реакција добијања кевлара

Након тога добијени полимер се раствара у концентрованој сумпорној киселини при чему се добија течност кристаласте структуре. Добијена течност се екструдира кроз ситне отворе пречника $12\mu\text{m}$ у хладну воду након чега се темељно испира и суши и тако добију влакна. Након што влакна очврсну она се режу по дужини и врши ткање у односу на жељену форму влакна.

На слици 13. је дата скица поступка.



Слика 13. Процес добијања арамидних влакана (кевлар). [14]

У односу на тип кевлара постоји више различитих примера употребе, као нпр. кевлар 29 који је лошијих карактеристика, нижег модула али високе чврстоће се користи као ојачање каблова за вучу. Док се кевлар 49 који има исту чврстоћу као кевлар 29, али већи модул и користи као висококвалитетно ојачање за конструкционе композите. [2]

Првобитна употреба арамидних влакана је била као ојачање код пнеуматика, како би им се побољшале карактеристике и радни век. Влакна у пнеуматикама утичу на масу и интензитет загревања пнеуматика због великог модула, високе специфичне чврстоће и стабилности (слика 14.)



Слика 14. Примена кевлара као ојачања код пнеуматика. [15]

Ојачање код резервоара за бензин код формуле 1 је такође кевлар. Висока затезна чврстоћа отежава пробијање резервоара у случају незгода и тиме је смањена опасност од пожара.

У аутомобилској индустрији се користе као и ојачања облога за квачило и јастучића за кочнице, тиме су деформације које настају од топлоте трења током рада сведене на минимум, јер кевлар има добру термичку отпорност.

Такође се користи и у узрази структурних елемената авиона, нарочито код стратешких бомбардера код којих се врата за бомбе односно "бомбалук" израђује од композита са овим типом ојачања.

Кевлар је одличан у пружању заштите од метака и убода ножем. Велика затезна чврстоћа му омогућава да апсорбује велику количину енергије и тиме има способност да драстично успори метак, пружајући заштиту од удара. Такође увођењем кевлара у израду заштитних одела, довело је до тога да одела буду флексибилнија и лакша у односу на раније примере где су били израђвани од челичних плоча (слика 15).



Слика 15. Заштитно одело израђено од кевлара. [16]

3.2.4 Влакна бора

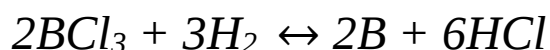
Борова влакна су сама по себи композитна, јер се на већ постојећа волфрамова или угљенична влакна поступком превлачења наноси бор. Ова влакна су већег пречника од осталих типова влакана дужине између 125-140µm. Такође материјали који користе борова влакна као ојачања се веома тешко механички обрађују због високе тврдоће бора. Данас су потиснута у употреби због високе цене и углавном су замењена угљеничним влакнима. [3]

Будући да је основа ових влакана волфрам она ће имати велику густину, велику затезну чврстоћу, висок модуло еластичности и биће отпорна на високе температуре.

Структура борових влакана зависи од спољашњих утицаја, тачније температуре. На температурама испод 1300 °C влакна су аморфна, на већим температурама добијају кристалу структуру. [4]

Борова влакна се производе CVD (*Chemical Vapor Deposition*) поступком, односно превлачењем волфрамовог или угљеничног влакна бором у процесу који се одвија континуирано у реактору. Волфрамово или угљенично влакно пречника 0.01mm се загрева у реактору електричним отпором изнад 1000 °C, након чега се убацују боров трихлорид и водоник, да би настао бор. Бор који је настао реакцијом између водоника и боровог трихлорида се таложи на волфрамово или угљенично влакно. Новонастало влакно бора, након изласка из реактора намотава се на калему за прикупљање и на њему врше провере. Током производње борових влакана, могу се појавити грешке које утичу на повећање напрезања у влакнима што негативно утиче на механичка својства, због тога су потребне провере током производње да би се осигурао квалитет влакана.

Једначина хемијске реакције између боровог трихлорида и водоника, којом се добија бор је:



Са обзиром да волфрам има велику густину као и велику цену, влакно волфрама мора да буде што већег пречника да би се смањили трошкови израде. То је случај и код коришћења угљеничних влакана где смањење трошкова производње диктира пречник влакана. Такође борова влакна настала таложењем бора на угљеничним влакнима имају глаткију површину од волфрамових влакана, што је последица глаткоће угљеничних влакана. [17]

На слици 16. су приказани реактори за добијање борових влакана



Слика 16. Реактори за добијање борових влакана. [18]

Борова влакна се користе у авио индустрији и неколико америчких војних авиона садрже важне компоненте које су ојачане овим влакнима са епокси смолом, као што су F-14, F-15 и Б-1.



Слика 17. Амерички борбени авион F-14A Томсат, који садржи компоненте ојачане боровим влакнима. [3]

Због отпорности на високе температуре ова влакна се користе у космонаутици и за температуре преко 1000 °C, као и у изради компоненти млазних мотора код суперсоничних војних авиона. Такође користе се и за израду елиса хеликоптера.

3.2.5 Влакна од Силицијум- Карбида (Керамичка влакна)

Влакна од силицијум карбида се добијају на сличан начин као и борова влакна, помоћу CVD (*Chemical Vapor Deposition*) поступка. Карактерише их ниска цена и користе се углавном као ојачање металних матрица (алуминијумских матрица и матрица од титанијумских легура) као и за ојачавање керамичких матрица.

Ова влакна добијена CVD поступком, се добијају помоћу реакције водоника са мешавином хлорованих алкил силана (као што је метилтрихлоросилан), на површини супстрата загрејаним електричним отпором. У овом случају влакно супстрата је угљенично влакно, обложено танким слојем пиролитичког графита. Добијено влакно је поликристално/3SiC. [17]

Ова влакна задржавају своје особине на температурама до 1400 °C, изнад ових температура долази до промена кристалне структуре и примећује видно ослабљење материјала.

Постоји неколико врста влакана од силицијум карбида произведена CVD поступком, неки од њих су SCS-6 који се користи као ојачање за легуре алуминијума и SCS-8 који се користи код легура титанијума.

Ова влакна се такође могу израђивати и од полимера која садрже угљеник и силицијум, неки од ових влакана су позната под комерцијалним именом "Nicalon" као и побољшана верзија ових влакана "Hi-Nicalon".

Да би се ова влакна произвела прво се поликарбонсилански полимер растопи да би се добила вишеслојна влакна, након чега се пиролизује у две температурне фазе. Прва температурна фаза је на 550 °C која служи за стабилизацију прекурсора да би он касније могао да се употреби, друга температурна фаза је на 850 °C да би се формирао силицијум карбид који садржи нестехиометријске облике SiC, SiO₂ и слободни угљеник [17].

Због садржаја нечистоћа у произведеном силицијум карбиду, модул еластичности је много мањи од чистог силицијум карбида, који је 220 GPa у односу на чисти који је 450 GPa. Такође има тенденцију распада на температурама изнад 1200 °C.

Због њихове отпорности на разне врсте хемикалија ова влакна могу да се користе у неповољним условима, као и за израду филтера, топлотних изолатора, итд. [20]

Такође могу да се користе у изради кућишта ракета.

3.2.6 Метална влакна

Метална влакна могу да буду у облику вискера, металне вуне и жице. Метална влакна у облику жице карактерише висока чврстоћа као и висока еластичност, најчешће су изграђени од: берилијума, молибдена, челика и волфрама. Будући да су ови материјали ватростални користе се као ојачања код суперлегура на бази никла и кобалта, док се жице од челика користе за ојачавање бетона и аутомобилских пнеуматика [4].

3.3 Форме Влакна

Влакна у матрици могу да у различитим облицима у зависности од карактеристика које се очекују од будућег материјала као и начина прераде тог материјала. Код неких материјала та влакна су континуирана, док су код неких материјала та влакна исечена, односно дисконтинуирана и дужине углавном од 3mm до 50mm [4].

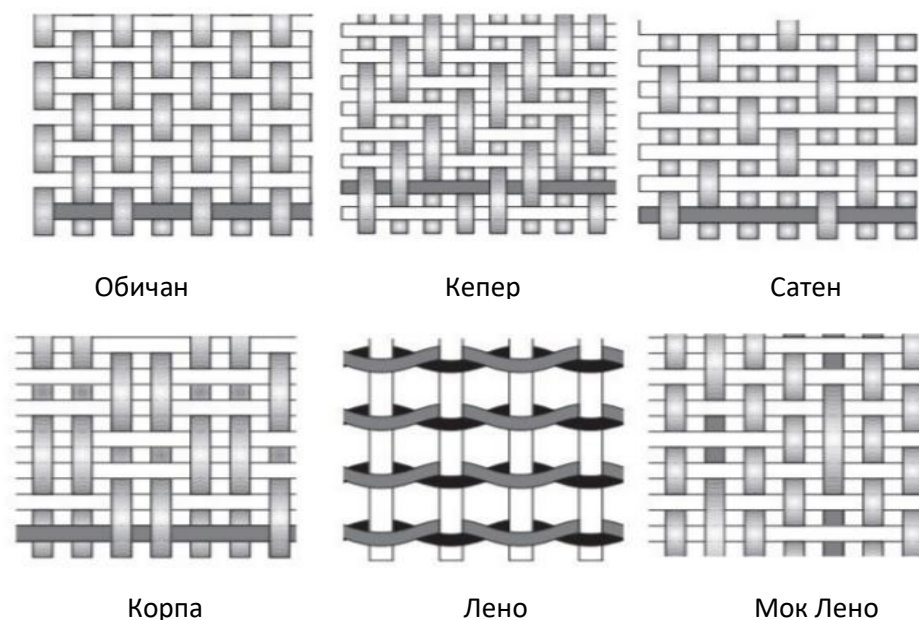
Континуирана влакна су најчешће доступна у облику струкова, односно слободних, неиспреплетаних нити влакана који су извлечена заједно у паралелним сноповима. Такође нити континуираних влакана могу да буду и испреплетана тако да формирају ужад или пређу. Комбинацијом намотаних облика континуираних влакана и њиховим ткањем могу се добити тканине или траке, које су далеко погоднија за уградњу у матрицу.

Најбоља својства материјала се добијају само уз одговарајући распоред влакана у композитном материјалу. Тканине са гушће испреплетаним влакнима имају процентуално већи удео у композиту као и тканине са мањим пречником влакана обезбеђују бољу додирну површину између ојачања и матрице, чиме се постиже боље везивање ојачања и матрице и тиме боље механичке особине.

Ткање у суштини представља преплетање нити влакана под различитим углом. Према оријентацији влакана, тканине могу да се поделе на: једносмерне, двоосне, вишеосне тканине као и тканине у облику мат-а. Такође постоје и хибридне тканине направљене од различитих влакана као и шивене тканине.

Код једносмерних тканина (енг. *unidirectional fabrics*), примарна влакна су оријентисана у једном правцу. Док друга влакна (секундарна) имају функцију да везују примарна влакна и одржавају њихов положај. Примарна влакна су углавном постављена под углом од 0° (уздужном правцу, енг. *warp*), али могу бити и под углом од 90° (попречном правцу, енг. *weft*), док су везујућа постављена у другим правцима да повезују примарна влакна. Влакна код једноосних тканина се лакше постављају на одговарајуће позиције при чему се постижу жељена својства у одговарајућем смеру (анизотропна својства). Једносмерне тканине се могу произвести помоћу: ткања, шивења и лепења. [21]

Двоосне тканине (енг. *woven fabric*) се састоје од влакана оријентисаних у уздужном и попречном правцу. Ове тканине се добијају преплетањем уздужних и попречних влакана. Целовитост тканине се постиже механичким спајањем влакана. Ове тканине се могу произвести шивењем. Постоји више врста двоосних влакана, а неки од њих који се највише користе су: обично, кепер, сатен, лено и мок лено (слика 18) [22].



Слика 18. Најчешће врсте ткања. [22]

Вишеосне тканине (енг. *multiaxial fabric*) су тканине код којих су влакна распоређена у више углова. Влакна ових тканина се повезују лепком или шивењем помоћу којег се остварује боља савитљивост.

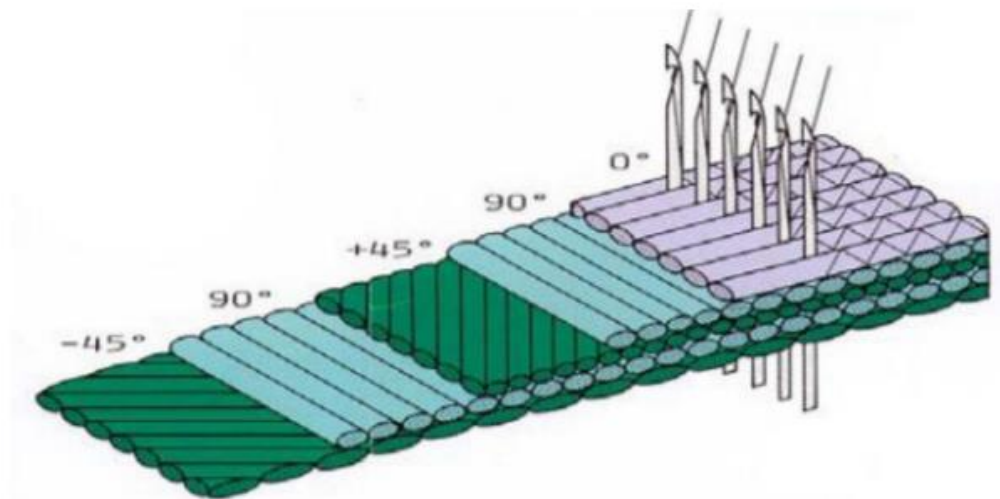
Влакна могу да буду и у облику мата. То су слојеви произвољно оријентисаних влакана повезаних везивом. Мат са дисконтинуираним влакнима се производи тако што се исецкана влакна насумично разбацују по тканини и повезују помоћу хемијских везива. Док се мат са континуираним влакнима производи на сличан начин, без скраћивања влакана, такође у овом случају је потребно мање везива. [4]

Хибридне тканине се састоје од више врста влакана. Код слојевитих структура где је потребно обезбедити карактеристике више врста влакана, то би било могуће обезбедити са више тканина где свака тканина садржи различиту врсту влакана. Али када се захтева структура са малом масом или дебљином, то се обезбеђује хибридним тканинама где ће се две различите врсте влакана налазити на једном слоју тканине. Најчешће комбинације које се користе код ових врста тканина су: угљенична и арамидна, стаклена и арамидна, угљенична и стаклена влакна. [23]

Хибридне тканине имају различита механичка својства у зависности од влакана која користе, али пресудан фактор за коришћење ових влакана је естетски изглед који је значајан код делова спортских аутомобила. Ове тканине се ређе користе у авиоиндустрији.

Шивене тканине се састоје из једног или више слојева дугих влакана који су повезани секундарним материјалом, најчешће полестерском нити. Могуће је постићи разне врсте оријентације влакана као и врсте влакана. Ове тканине имају добре механичке карактеристике, зато што процесом шивења не долази до савијања влакана као и постизање велике густине приликом производње. Недостатак је скупа, спора и сложена производња, појава грешака попут недостатака влакана. Један од начина производње ових влакана се назива истовремено шивење. [24]

Процес истовременог шивења се одвија на специјалним машинама заснованим на поступку плетења. Постоји више врста ових машина у зависности од прецизности на који начин су влакна постављена, односно способност одржавања влакана паралелним. Ове врсте машина имају оквир, на који се постављају влакна под одређеним углом за сваки слој истовремено, док одговарајући слојеви не буду састављени. Након тога их повеже као што је приказано на слици 19.



Слика 19. Поступак истовременог шивења. [24]

4. Поступци производње полимерних композита

3.4.1 Поступци у отвореном калупу

Код ових поступака користи се само једна површина калупа, која може бити позитивне или негативне оријентације. Материјали који се користе у овим поступцима су углавном дуромерне смоле, као што су епокси смоле и полиестер. Док се за ојачања углавном користе стаклена влакна (Е-стакла). Смола и влакна се наносе слој по слој док се не добије жељена дебљина композита. [4]

Поступци са отвореним калупом имају низ предности у односу на поступке са затвореним калупом као што су: цена, зато што се користи само једна страна калупа, могућност производње великих и комплексних струкура, као и могућност коришћења великог броја материјала.

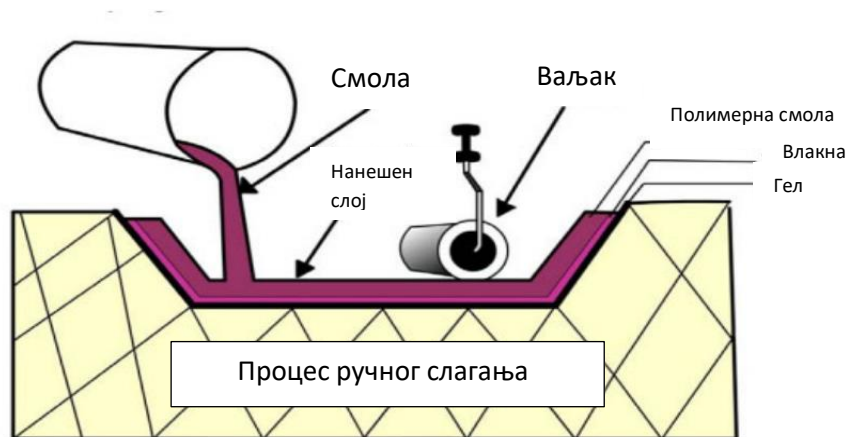
Неки од недостатака су ти што ће само једна површина производа да буде глатка и правилна, као и што је потребно уложити доста труда у наношењу слојева смоле и влакана. Проблем наношења слојева се последњих година решио аутоматизацијом прераде у отвореном калупу, где није само побољшана прецизност будућих производа већ и количина.

3.4.1.1 Ручно слагање

Поступак ручног слагања (енг. *Hand Lay-Up*), је најстарији поступак производње композита са отвореним калупом, код овог поступка, слојеви смоле и влакана се ручно наносе на површину отвореног калупа. Поступак ручног слагања се може поделити на пет корака и то: чишћење, наношење гела, наношење слојева смоле и влакана, очвршћавање и скидање комада. [4]

Први корак је чишћење калупа током којег се наноси и гел за лакше одвајање комада материјала. У другом кораку се наноси друга врста гела, која може да садржи пигменте, помоћу којих се постиже жељена боја површине, такође поменути гел служи и за побољшање механичких карактеристика површине. У трећем кораку се почиње са наношењем слојева матрице и ојачања, такође је потребно да се сваки слој матрице изравња са ваљком да би се остварила боља веза између матрице и влакана и како би се елиминисали евентуални заостали мехурићи ваздуха. Смола се наноси ручно, помоћу четкице или распршивача. Трећи корак се понавља све док се не добије жељена дебљина материјала, док се очвршћавање се одвија на собној температури.

На слици 20. је приказан шематски приказ процеса ручног слагања.



Слика 20. Процес ручног слагања. [25]

Предности овог поступка су: мали трошкови израде и алата, велики избор материјала, једноставност, могућност постизања компликованих и великих облика, могућност исправљања грешака током почетних стадијума производње, итд. Неке од негативних страна су мале серије, грубе површине као и што се приликом ламинације користе смоле ниске вискозности. (4)

Овај процес се користи за производњу бродских трупова, базена, танкера као и неких аутомобилских делова. Овај поступак није економичан због мале производне стопе.

3.4.1.2 Распршивање

Поступак распршивања (енг. *Spray-Up*), је поступак помоћу којег се исецкана влакна заједно са смолом распршују по унутрашњој страни отвореног калупа помоћу специјалног распршивача. Поступак се понавља све док се не добије жељена дебљина материјала. Алат потребан за овај поступак је: пиштољ за распршивање, сецкалица за влакна као и систем довода смоле и ваздуха. [4]

У сецкалицу се убацују континуирана влакна, која се секу на дужине између 25 и 75mm. Исецкана влакна се додају млазу смоле која излази из пиштоља за распршивање. Овим начином мешања смоле и ојачања се постиже случајан распоред влакана.

Постоји више врста пиштоља за распршивање који се користе у овом поступку као што су пиштољи са: унутрашњим или спољашњим мешањем са или без ваздуха.

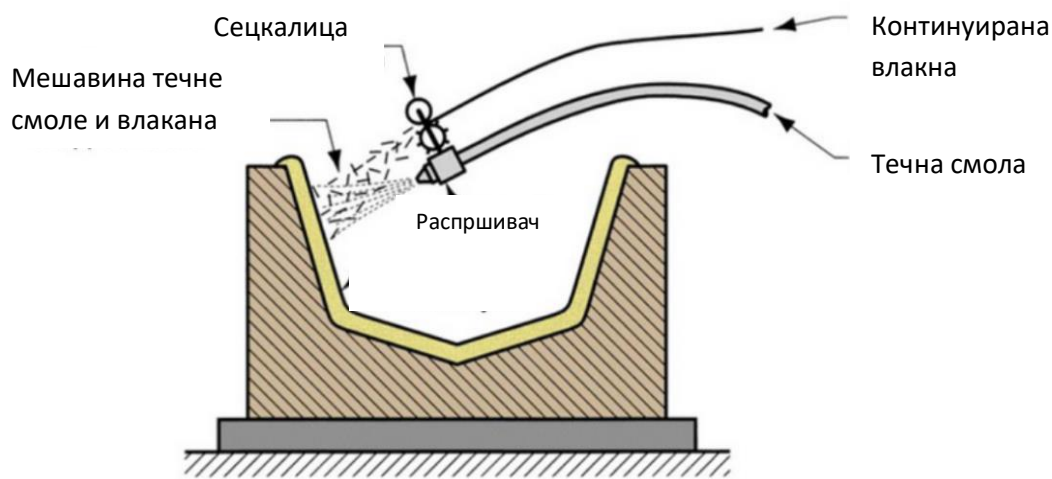
Код пиштоља са унутрашњим мешањем без ваздуха, смола и влакна долазе одвојеним каналима у заједничку комору где се измешају, након чега излазе из млазнице пиштоља. Код ових врста пиштоља долази до равномернијег мешања смоле и влакана при чему се постиже већи квалитет као и што се може остварити уштеда у смоли. Недостатак оваквог начина распршивања је компликованије одржавање пиштоља, јер је потребно редовније чишћење коморе за мешање. Ово је уједно и најповољнија врста пиштоља.

Рад пиштоља са спољашњим мешањем без ваздуха је исти као и код пиштоља са унутрашњим мешањем, разлика је само у комори за мешање, која у овом случају није затворена. Предност ових пиштоља у односу на претходне је у томе што није потребно често одржавање, при чему се олакшава сам процес. Недостатак је слабији квалитет мешања.

У случају да се у канале за довод смоле и влакана дода ваздух рад са овим пиштољима се поједностављује, али има и негативне стране као што је опасност од заробљивања ваздуха у структури што доводи до веће порозности.

Након распршивања потребно је ручно или аутоматизовано изравњати нанешени слој, помоћу ваљака. Ручни ваљци се користе за мање конструкције, док се аутоматизовани ваљци користе за веће конструкције које имају равне површине.

Шематски приказ поступка је приказан на слици 21.



Слика 21. Поступак распршивања. [26]

Поступак распршивања је сличан процесу ручног слагања али постоји разлика у количини влакана која код процеса распршивања не прелази 35%, док је код поступка ручног слагања удео много већи, до 70%. Као и што се код поступка ручног слагања постиже боља чврстоћа јер могу да се користе и континуирана влакна. [4]

Такође поступак распршивања може да послужи као алтернатива поступку ручног слагања у наношењу смоле и влакана као и наношењу гела.

Неке од предности овог поступка су: мањи удео људског рада, већа брзина, лакше руковање опремом, могу да се користе једноставнији и јефтинији калупи.

Компоненте које се израђују овим поступком, такође могу да буду израђене и поступком ручног слагања. Неке од примена овог поступка су у изради: бродских трупова, туш кабина, када, делова каросерије аутомобила, цистерни, контејнера, намештаја, итд.

3.4.1.3 Техника аутоклава

Техника аутоклава (енг. *Autoclave Moulding*), је поступак код кога се добијају делови од композитних материјала у посебним коморама познате као аутоклав пећи. Аутоклав је посебна врста коморе под притиском у којој се врши полимеризација. Аутоклав пећи у себи садрже азот или угљен диоксид под притиском, који може имати вредност до максималних 15МПа. Загревање у аутоклав пећима се остварује помоћу електричних или плинских грејача, до максималне температуре од 700 °C. Такође управљањем процесом у аутоклав пећима може да буде и дигитализовано, преко рачунара где се могу постићи одговарајући процеси полимеризације.

Код овог поступка се углавном користе преимпрегниране тканине односно преимпрегнат или препрег (енг. *PREimPREGnated*).

Препрег представља траку, тканину, неусмерена или једносмерно усмерена влакна импрегнисана делимично полимеризованом смолом. Препрег се добија провлачењем између ваљака траке смолом импрегнисаних влакана или тканине, обложених са обе стране силиконизованим папиром или пластичним филмом, да би се обезбедило консолидовање импрегната и квашење влакана. [2]

Препрег је потребно делимично полимеризовати, што се остварује држањем производа на одређеној температури и каснијим замрзавањем како би се складиштио на дуже време. Будући да је смола у препрегу делимично полимеризована, доприноси флексибилности материјала.

Код технике аутоклава користе се углавном препрези са стакленим, угљеничним, арамидним, органским и борним влакнима. Док се за матрице најчешће користе епоксидне, фенолне и бизмалеимидне смоле.

Поступак у аутоклав пећима почиње са исецањем траке препрега у жељени облик са одређеном оријентацијом влакана и слагањем на површину калупа у слојевима. Слојеви препрега се подлежу температурама и притисцима којима се постиже одогаврајуће истискивање вишка смоле, као и што краће време полимеризације. Поступак у аутоклав пећима траје око 6 сати, при чему се у првих сат времена на температури од око 125°C истискује смола, док се остатак времена врши полимеризација препрега на температури од око 175 °C. [4]

Овај поступак се углавном користи у авио индустрији због постизања високе чврстоће, крутости и доброг квалитета крајњег производа. Неки од недостатака овог поступка су време поступка, потреба за одржавањем потребног притиска и температуре, потребе за додатним материјалима.

3.4.1.4 Намотавање

Намотавање (енг. *filament winding*) је поступак при коме се континуирана влакна, претходно натопљена смолом намотавају на цилиндрични модел. Овим поступком се производе шупљи делови цилиндричног облика.

Неке од предности овог поступка производње су: поновљивост тј. могућност узајамног стварања производа истих карактеристика, ниска цена производње и опреме потребне за овај поступак, могућност креирања великих делова, велики проценат влакана у композиту што повећава чврстоћу материјала. [4]

Негативне стране овог поступка су: стварање компликованијих производа доводи до повећања цене израде, површина производа није задовољавајућа и потребна је накнадна машинска обрада.

Најчешће се користе стаклена, угљенична и арамидна влакна, док се као матрице могу користити пластомери и дуромери, најчешће дуромерне смоле попут епоксида и смола полиестера и винилестера. Епоксидне смоле се користе тамо где су потребне добре механичке карактеристике, као што је авио индустрија. Док се јефтине полиестерске смоле користе у комерцијалним производима.

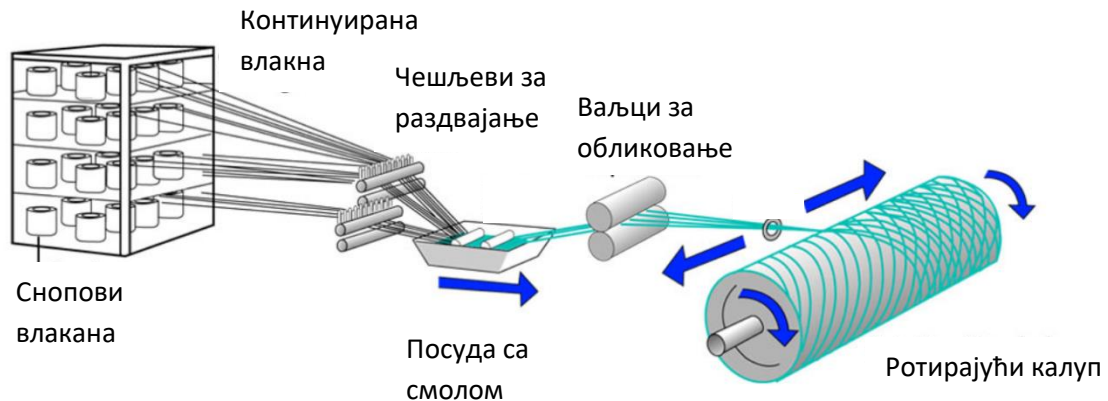
Постоји више поступака намотавања у зависности да ли се користе преимпрегрирана влакна (суво намотавање) или влакна која се натапају смолом непосредно пред процес намотавања (мокро намотавање). Такође постоји и поступак намотавања где се влакна намотавају на осовину (калуп) без икаваог додатног материјала, већ се смола касније додаје и овај начин је познат као пост-импрегнација. [4]

Код сувог намотавања, врши се намотавање препрега на калемове. Они се намотавају без претходног проласка кроз суд са смолом. Неки од недостатака препрега су виша цена као и опасност од превременог стврдњавања, из тог разлога ове препреге је потребно држати на одређеним температурама. Такође могу се и користити разне врсте растварача како не би дошло до превремене полимеризације. Полимеризација се може вршити у аутоклаву, код потреба за високим перформансама конструкција.

Код мокрог намотавања, влакна пре намотавања пролазе кроз суд са смолом или ваљке натопљене смолом, да би се повећала натопљеност влакана у смоли, влакна се пре потапања у суд са смолом загревају на одређеној температури. Контрола наношеног слоја смоле је отежана, и количина нанешене смоле зависи од вискозности истопљене смоле, брзини намотавања, напрезању влакана, итд. Овај поступак се више користи од сувог намотавања јер је јефтинији али је уједно и компликованији. Полимеризација се врши у пећима или на собној температури.

У односу на врсту намотавања постоји више подела, као што су: спирално, прстенасто, паралелно и поларно. Најчешће се примењују спирално и поларно намотавање. Код спиралног намотавања осовина (калуп) ротира око своје осе, а вођица влакна се помера паралелно са осом калупа у већим размацима. Код овог начина потребно је понављање

процеса намотавања како би се покрила површина калупа, јер влакна нису једна поред других. Код поларног намотавања калуп је непомичан, док се вођица заједно са влакном ротира око уздужне осе калупа под одређеним углом. Када се вођица влакна једном окрене око осе калупа, он се заротира за дебелину влакна. Парарелним намотавањем се постиже парарелно слагање влакана које се намотава на калуп. У овом случају вођица се креће парарелно са осом калупа, као код спиралног намотавања, али знатно спорије како би се остварило уједначено намотавање. На слици 22. је приказан шематски приказ поступка намотавања.



Слика 22. Поступак намотавања. [27]

Након што је завршен процес намотавања, следи полимеризација нанетог материјала, што се остварује у специјалним пећима. Узорак се оставља одређено време на једној или више температура, такође је могуће и процес полимеризације код неких материјала остварити и на собним температурама.

Одвајање калупа се врши на различите начине у зависности од врсте калупа, односно да ли је предвиђен за виšekратну или једнократну употребу.

Намотавање се врши на специјалним машинама којих има више врста у зависности од врсте намотавања. На њима је могуће наместити жељене узорке намотавања, брзину и углове намотавања, температуру смоле као и напрегнутост влакана. Данас се користе нумерички управљане машине занамотавање, чији се *NC* кодови добијају у специјално *CAD* програмима.

Због ниске цене добрих карактеристика крајњег производа овај поступак се све више развија и примењује. Користи се за производњу осовина авиона и хеликоптера, лопатица ветрењача, боца за кисеоник и гас, цеви, делова ракета, конструкцијских елемената и спортске опреме. Такође могуће је производити облике који нису стриктно цилиндрични.

3.4.2 Поступци у затвореном калупу

Поступци са затвореним калупуом су веома чести код израде композитних материјала. Неки од примера поступака у затвореном калупу су: вруће пресовање у калупу, инјекционо пресовање у калупу, пултрузија и убризгавање смоле.

3.4.2.1 Вруће пресовање у калупу

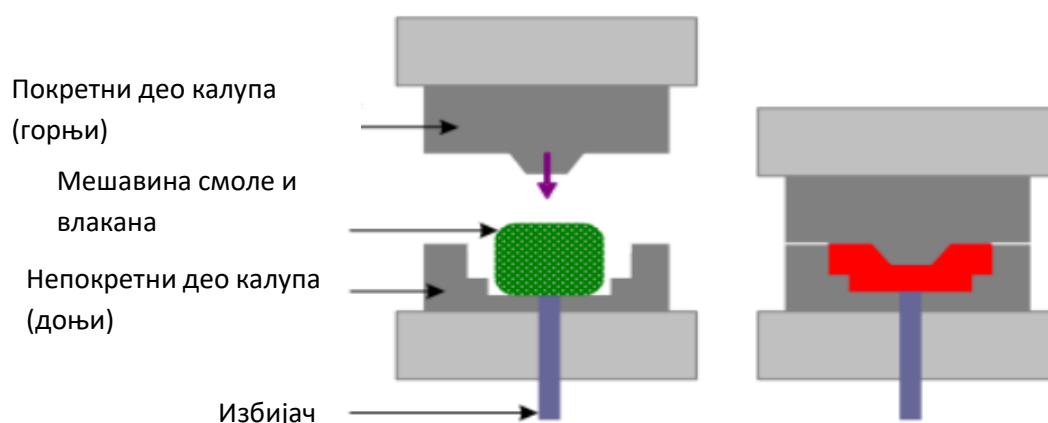
Код врућег пресовања у калупу (енг. *Compression Moulding*), калупи или алати који се могу загревати испуњени си полазним материјалом (мешавина полимера) и под дејством притиска и повишене температуре материјал се полимеризује и на тај начин добијају композитни делови, облика шупљине калупа.

Поступак започиње постављањем полазног материјала у загрејани калуп и повећањем притиска и температуре, постиже се течење смоле и влакана. Смер течења одређује одређује оријентацију влакана. Након завршеног течења смеше смоле и влакана и попуњавања празнина у калупу, започиње процес полимеризације, при чему је калуп још увек под притиском. Када је постигнут задовољавајући степен полимеризације, обликовани производ се вади из калупа и полимеризација може да се настави у пећима. Добијени производ има високу крутост, чврстоћу као и добар квалитет површине. [4]

Овај поступак је сличан ковању, али за разлику од ковања потребно је више времена због процеса полимеризације.

Овај поступак се користи у аутомобилској индустрији за прозводњу браника, врата, кровова као и за производњу кутија и кућишта у индустрији електронике.

Поступак врућег пресовања је приказан на слици 23.



Слика 23. Поступак врућег пресовања. [28]

Осим врућег пресовања у калупу постоји и поступак хладног пресовања, код којих до полимеризације долази на ниским температурама без загревања калупа. Неке од

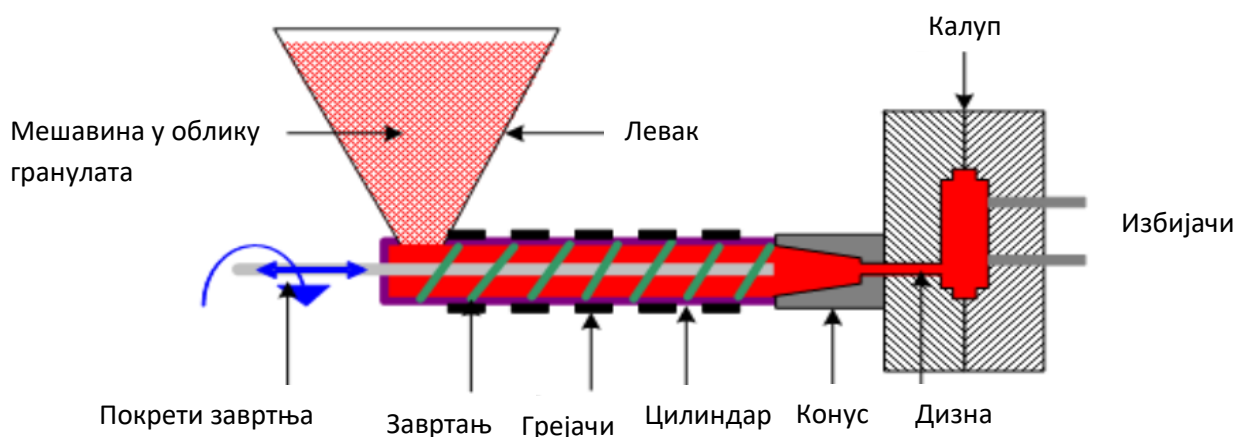
предности овог поступка у односу на вруће пресовање су: нема загревања калупа, силе држања калупа су ниске што појефтинује производњу, итд. [4]

3.4.2.2 Инјекционо пресовање у калупу

Инјекционо пресовање (енг. *Injection Moulding*) у калупу, је процес где се истопљена смола помешана са кратким влакнима убризгава, углавном под високим притиском, у шупљину или прорез калупа и ту полимеризује. [2]

Поступак инјекционог пресовања у калупу се састоји из два дела. Први део се односи на мешање смоле и влакана, а други на само убризгавање мешавине смоле и влакана у калуп. Прво се започиње са мешањем смоле и влакана и важно је напоменути да је поменута мешавина у форми гранулата. Гранулат се допрема до алата за инјекционо пресовање помоћу левка, након чега се помоћу ротационог кретања завртња потискује према калупу. Завртањ у алату за инјекционо пресовање осим ротационог има могућност и транслаторног кретања. При процесу попуњавања калупа отопљеним полимером, завртањ је повучен напред, док се при завршеном процесу попуњавања повлачи назад. Грејни елементи су постављени изнад цеви алата за инјекционо пресовање, који има функцију да омекша и растопи полимер. У самом калупу се налази елемент за хлађење, који убрзава процес очвршћавања полимера, који се након завршеног процеса очвршћавања отвара помоћу избацивача. [28]

Шематски приказ описаног поступка је приказан на слици 24.



Слика 24. Шематски приказ инјекционог пресовања у калупу. [28]

Овај поступак производње је погодан за серијску производњу, јер се након попуњавања једног калупа може прећи на пуњење следећег са преосталом масом из левка. Сам поступак је релативно брз, али има ограничење у виду влакана, јер се користе само кратка влакна и због тога има ограничења у степену ојачања композитног материјала.

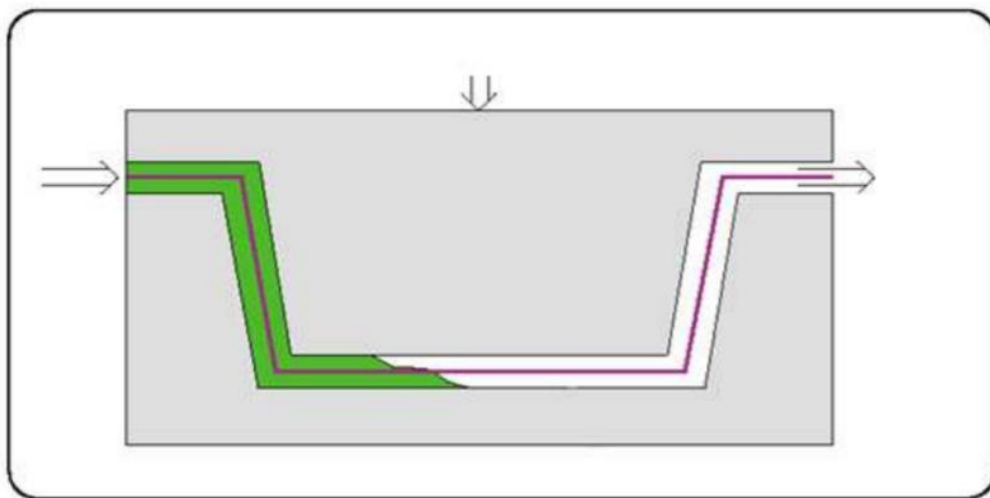
Овај поступак се може користити где се користи и поступак са врућим пресовањем у калупу, са предношћу у брзини поступка.

3.4.2.3 Убризгавање смоле

Код поступка убризгавања смоле (енг. *Resin Transfer Moulding-RTM*), влакна најчешће у облику тканине се смештају у калуп који се затим затвара. Смола се под притиском убризгава у шупљину калупа. Смола најпре кваси влакна, а затим попуњава шупљину калупа. [2]

RTM поступак је идеалан за конструкције које захтевају високу чврстоћу и велику крутост. Будући да су ојачања већ убачена у калуп пре убризгавања смоле, смола мора да буде довољно висkozна да би поквасила влакна и попунила шупљину калупа. Због мале вискоznости смоле, притисци у калупу си између 90 и 600 kPa. Могу се користити епоксидне смоле, незасићене полиестерске смоле и фенолне смоле, док се као ојачања могу користити различита влакана. [4]

Шематски приказ поступка је приказан на слици 25.



Слика 25. RTM поступак. (3)

Предности овог поступка су: велики проценат vlakana у материјалу, мали садржај ваздуха, могућност аутоматизације поступка, добар квалитет површина. Док су недостаци: висока цена алата и ограниченост у димензијама. [3]

RTM postupak polako замењује аутоклавне поступке у изради спортске опреме и авио индустрији. [4]

3.4.2.4 Пултрузија

Пултрузија (енг. *Pultrusion*), је поступак који се примењује за производњу композитних производа константног попречног пресека (штапови, цеви, греде, итд.). Овим

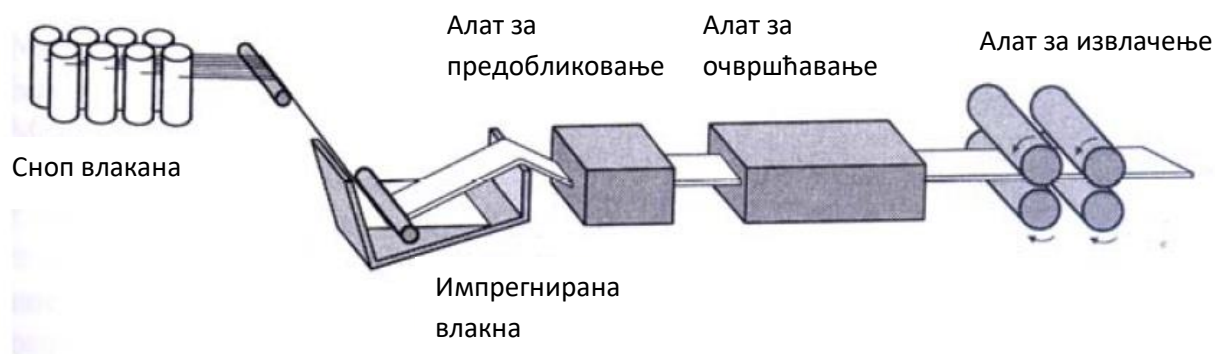
поступком, сноп континуираних влакана, претходно импрегнираних дуромерном смолом, провлаче кроз алат одговарајућег облика након којег следи очвршћавање којим се добија завршни облик. [3]

Материјали матрица који се користе у овом поступку су најчешће полиестерске, винилестерске и епоксидне смоле. Док су ојачања: стаклена, угљенична и арамидна влакна, са уделом између 40 и 70%.

Поступак се састоји из неколико узастопних јединица и то: система снабдевања влакнима, импрегнатора влакана са течном смолом, алата за обликовање, алата за очвршћавање, алата за извлачење и резалице. [4]

Суштина процеса је да се течна смола, проласком кроз систем алата за пултрузију, трансформише у чврсти финални композитни производ. Чврсто стање мора бити остварено на крају поступка, како би алат за извлачење могао да делује. Током поступка, влакна у облику трака, тканина или мат-а се провлаче кроз импрегнатор са течном смолом након чега се влакна провлаче кроз ваљке, да би се обезбедило боље влажење. Влакна се затим подлежу алату за предобликовање, који има за циљ да истисне вишак смоле и обликују влакна. Након завршеног процеса обликовања влакана, влакна пролазе кроз загрејани алат за очвршћавање, чија температура зависи од врсте смоле. Задатак алата за очвршћавање одржавање оријентације влакана, постизање одговарајућег облика и очвршћавање композита. Композит се након алата за очвршћавање налази у чврстом стању и пролази кроз алат за извлачење, брзина овог алата одређује брзину пултрузије. На крају машине за пултрузију се налази резалица која реже профиле одговарајућих димензија.

Шематски приказ поступка пултрузије је приказан на слици 26.



Слика 26. Процес пултрузије. [3]

Неке од предности коришћења полимерних композита добијених овим поступком су: висока специфична чврстоћа, велика отпорност на корозију и хемијске утицаје, обрадивост, димензијска стабилност и добар квалитет површине. [4]

Примери прозвода добијених овим поступком су: антене, оквири врата и прозора, конструкцијски елементи за грађевинарство (мреже, плоче, штапови), кућишта електричних уређаја.

5. Композитни материјали са металном матрицом (ММС)

Метали као материјали матрица се најчешће користе из разлога као што су: могућност коришћења у високом распону температура, поседовања високе попречне крутости и чврстоће као и жилавости, велике отпорности на радијацију као и отпорност на запаљивост, добру електричну и топлотну проводљивост, могућности израде помоћу већ конвенционалних начина обраде метала. [4]

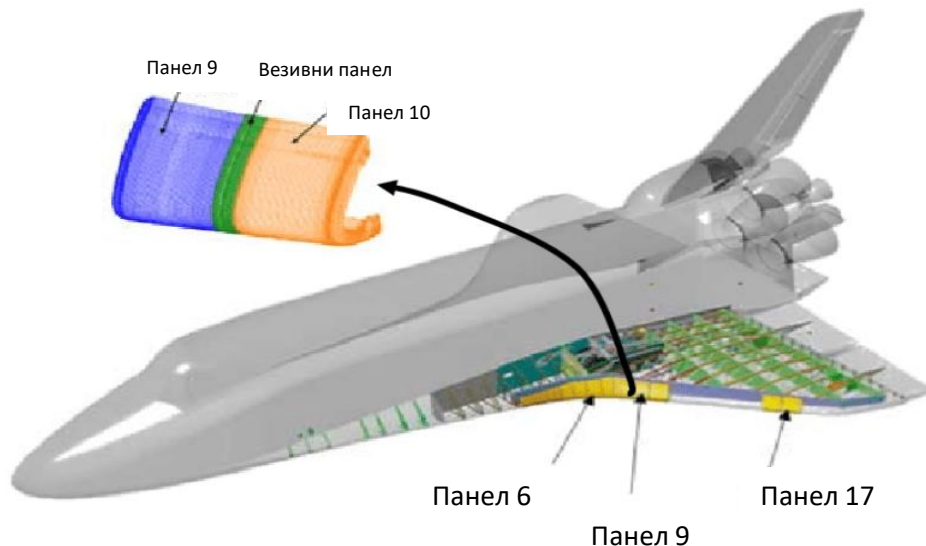
Неке од негативних карактеристика композитних материјала са металном матрицом су: цена материјала као и поступка израде, опасност од корозије као и чињеница да већина метала има велику масу.

Метали који се користе у изради матрица су углавном: алуминијум и његове легуре, бакар, магнезијум, титанијум, итд.

Највећи удео у тржишту металних композитних материјала заузимају композити за алуминијумском матрицом (енг. *Aluminium Matrix Composites- АМС*), могу да се користе и на температурама изнад 300 °C и његове легуре се углавном ојачавају боровим влакнима или боровим филаментима (борова влакна пресвучена силицијум карбидом). У зависности од типа алуминијума, могу се остварити различите карактеристике будућег композита као што су побољшање чврстоће, крутости и отпорности на корозију у случају да се користи алуминијум 6061, док алуминијум 2024 пружа највећу чврстоћу.

Метални композити са алуминијумском матрицом су посебно развијени за потребе авио индустрије, посебно са ојачањем од борових влакана, јер тиме постиже велика крутост и чврстоћа ($E=207000\text{N/mm}^2$, $R_m=1515\text{N/mm}^2$). [3]

Пример примене ове комбинације матрице и ојачања је изради свемирске летелице (слика 27.)



Слика 27. Конструкција летелице "Space Shuttle Orbiter". [29]

Легуре магнезијума се углавном ојачане угљеничним влакнима, помоћу којих се повећава чврстоћа као и модуло еластичности који може да варира од 177MPa до 90GPa. Матрицу од магнезијума у комбинацији са боровим влакнима карактерише веома добро повезивање као и добра расподела оптерећења. [4]

Композити са бакарном матрицом ојачани са боровим влакнима се користе у случајевима када је потребна добра топлотна проводљивост, као што је пример код авиона *National Aerospace Plane of USA (NASP)*.

Титанијум се такође углавном ојачава са боровим влакнима и може се користити на температурама до 800 °C.

Металне матрице могу да буду ојачане ојачањима у облику честица, континуираних и дисконтинуираних влакана чиме се повећава специфична крутост и чврстоћа. Материјали континуираних влакана могу бити на бази угљеника, силицијум карбида, угљеника, алуминијума и тврдих метала. Док су материјали дисконтинуираних влакана углавном на бази угљеника и алуминијума. [3]

5.1 Поступци производње

Поступци производње композита са металном матрицом се састоје из најмање два корака, при чему се први корак односи на сједињавање матрице и влакана, а други је завршно обликовање. [3]

Развијене су различите методе производње композитних материјала са металном матрицом, међу којима су најзаступљенији процеси у течном и чврстом стању. [30]

5.1.1 Поступци у течном стању

Процеси у течном стању (енг. *Liquid-State Processing*), су процеси код којих је матрица у виду течног металног раствора и која се везује за влакна. Влакна се углавном превлаче слојевима заштите, ради спречавања нежељених хемијских реакција и повећања отпорности на високе температуре, које су настале због природе процеса производње.

Постоји много начина производње композитних материјала са металном матрицом заснованим на процесуирању композита у течном стању, као што су: ливење мешањем, ливење под притиском, метода таложења спрејом, итд.

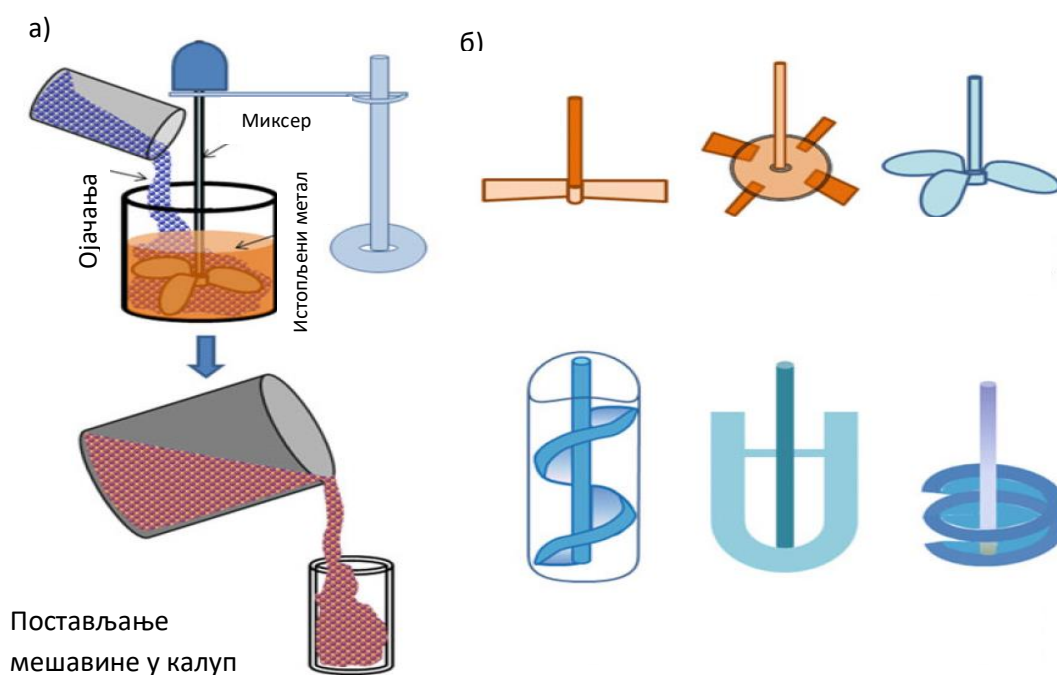
5.1.1.1 Ливење мешањем

Поступак ливења мешањем (енг. *Stir Casting*), је један од највише коришћених металуршких поступака, који се користи за добијање композитних материјала са металном матрицом. Суштина поступка је у мешању ојачања, која могу бити у облику честица или влакана са растопљеним металним раствором. Ојачања која су у чврстом стању, се мешају са металним раствором и након тога остављају да се учвршћују на разне начине, као што су у специјалним пећима или у неким случајевима и на собној температури. [30]

Хомогеност будућег композитног материјала, зависи од брзине мешања и времена трајања поступка. Добро повезивање матрице и влакана, такође у великој мери зависи од ефикасности мешања, који се може контролисати различитим врстама облика оштрица миксера.

При овом поступку, могуће су многе неправилности у виду унутрашњих микропукотина као и нагомилавања материјала. Ове неправилности се елиминишу тако што се поступак очвршћавања изводи брзо, при чему се добија правилнија структура будућег композитног материјала.

Шематски приказ поменутог поступка је приказан на слици 28.

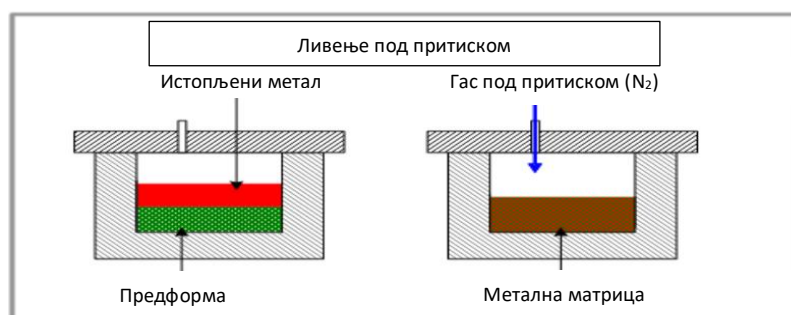


Слика 28. а) Шематски приказ поступка ливења мешањем. б) различите врсте облика оштрица миксера. [30]

5.1.1.2. Ливење под притиском

Поступак ливења под притиском (енг. *Squeeze Infiltration*), је поступак који може бити остварен спољашњим притиском односно притиском који ствара покретни део калупа и притиском гаса.

Поступак ливења под притиском гаса (енг. *Gas Pressure Infiltration*), поступак који укључује постављање порозног предоблика у загрејани калуп, који се касније исупањава растопљеним металом, под утицајем гаса под притиском. Овим поступком се смањује утрошак материјала и енергије, због релативно кратког времена трајања поступка. Овај поступак служи за добијање делова великих димензија, такође и влакна не морају да буду превлачена слојевима заштите, због релативно кратког времена која она проводе у додиру са врућим металним раствором. [30] Шематски приказ поступка је приказан на слици 29.

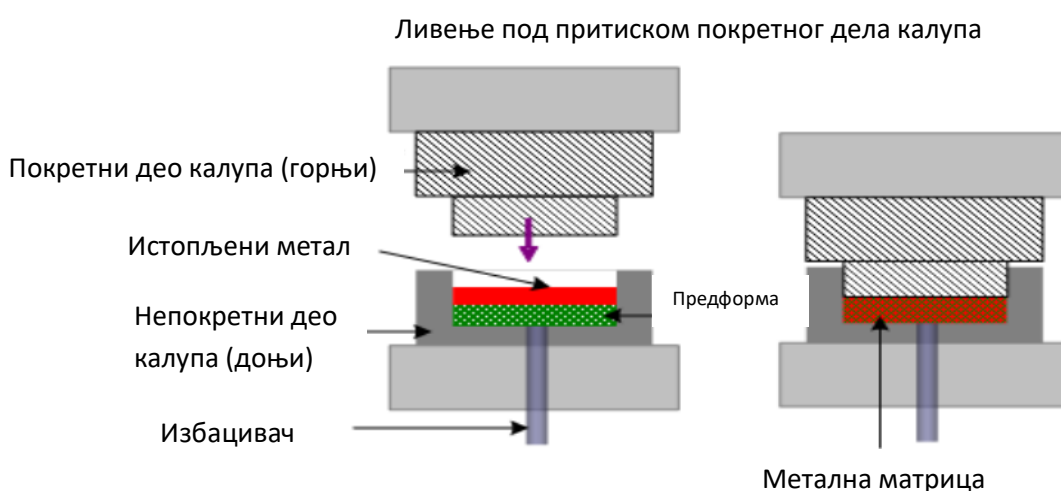


Слика 29. Шематски приказ ливења под притиском гаса. [31]

Осим гаса под притиском, код овог поступка може да се користи и притисак који се ствара помоћу покретног дела калупа. Влакна се постављају у доњи део калупа, којима се додаје потребна количина растопљеног метала, након тога горњи део калупа се спушта и притиска растопљени метал ка влакнима, да би дошло до сједињења метала и влакана. Због притиска који се ствара, долази до очвршћавања метала. Након завршеног процеса, добијени део се извлачи помоћу чивије за избацивање. [30]

Овај поступак се користи за добијање малих делова конструкција, као што су клипови аутомобилских мотора, од легуре алуминијума ојачаних кратким влакнима глинице. [31]

Шематски приказ описаног поступка је приказан на слици 30.



Слика 30. Шематски приказ ливења под притиском насталим горњим делом калупа. [31]

5.1.1.3. Таложeње спрејом

Поступак таложeња спрејом (енг. *Spray Deposition*), је поступак код кога растопљени метал помешан са влакнима пада на непокретну подлогу и тиме стварајући чврсту предформу.

Процес започиње топљењем метала у пећи и његовим провлачењем кроз ситне отворе, након чега долази у контакт са инертним гасом под притиском који убризгава влакана у растопљени метал, тако стварајући капљице метала. Капљице се касније талоче на непокретну површину и тиме сварају предформу. Код овог поступка није могуће одржати равномерну расподелу ојачања, али је зато поступак релативно јефтин. [32]

5.1.2 Поступци у чврстом стању

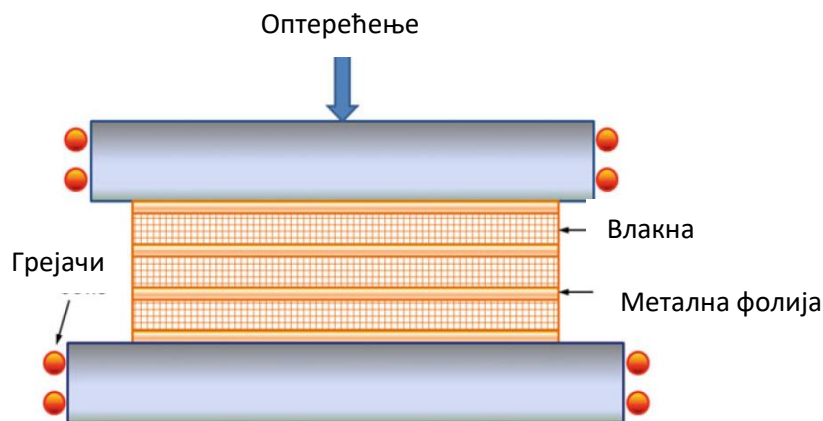
Ови поступци се одвијају на нижим температурама и могуће је боље контролисати термодинамичке и кинетичке граничне равни. Постоји много начина добијања композитних материјала са металном матрицом, најзаступљенији поступци су: дифузно спајање и синтеровање односно металургија праха.

5.1.2.1 Дифузно спајање

Ово је чест поступак производње металних композита, одвија се на повишеној температури при високом притиску. Поступак дифузног спајања мора бити контролисан, јер може доћи до појаве кртих фаза у будућем композитном материјалу.

Поступак започиње постављањем слојева материјала матрице и ојачања између делова машинске пресе. До спајања долази у контакту између чистих металних површина услед високог притиска и температуре. Притисак служи да би се остварио што бољи контакт између површина метала и ојачања, док се температура повећава да би дошло до међу дифузије атома на површини између метала и ојачања, чиме долази до њиховог сједињавања. Неке од предности овог поступка су могућност коришћења великог броја материјала за матрицу као и велики избор распореда влакана као и запремински удео. (32)

Шематски приказ поступка дифузног спајања је приказан на слици 31.



Слика 31. Поступак дифузног спајања. [30]

Овај поступак се користи за израду једноставних конструкција, као што су плоче и цеви.

5.1.2.2 Металургија праха

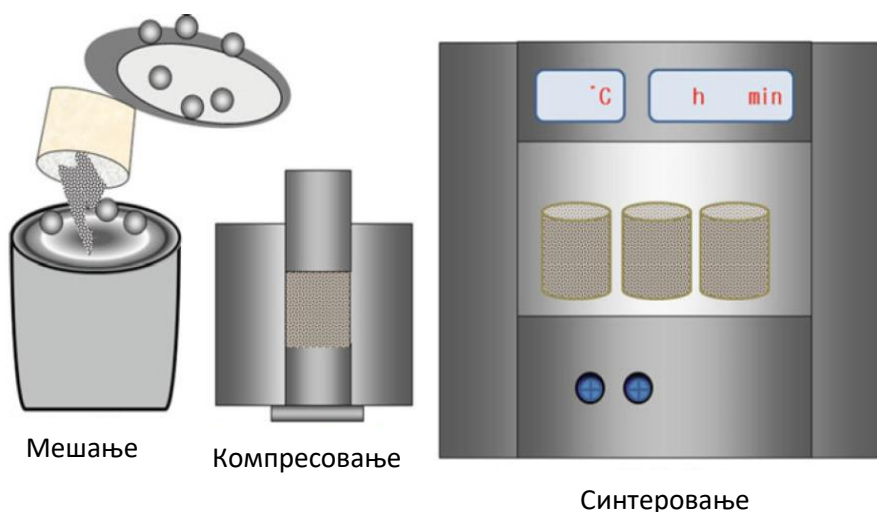
Металургија праха (енг. *Powder Metalurgy*), је поступак поступак израде металних композитних материјала код кога се прах матричног материјала меша са прахом

дисперговане фазе у облику честица или кратких влакана за накнадно збијање и синтеровање у чврстом стању. [32]

Поступак започиње мешањем праха метала и ојачања и каснијим компресовањем, који има за циљ добијање збијене фазе, односно зелене фазе (енг. *“green” compact*). Након добијања збијене фазе мешавине праха, долази до загревања мешавине до високих температура, али испод температуре тачке топљења метала, која има за циљ да се честице праха ојачања споје са честицама праха метала и тиме долази до њиховог сједињавања, чиме се остварује процес синтеровања.

Овај поступак је погодан за производњу сложених делова, са grubим толеранцијама, али није погодан за серијску производњу због цене прашкастог материјала.

Шематски приказ поступка је приказан на слици 32.



Слика 32. Поступак металургије праха. [30]

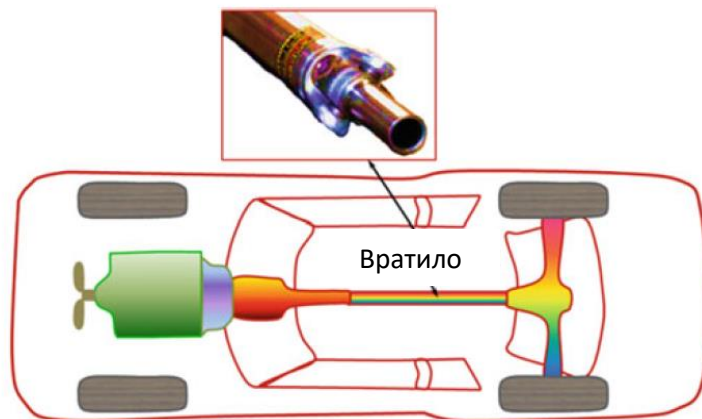
5.2 Примена композитних материјала са металном матрицом

Композитни материјали са металном матрицом налазе примену у аутомобилској индустрији, тачније за израду компоненти аутомобила као што су: погонско вратило за аутомобиле, кочиони диск, итд. Користе се још и у изради делова свемирских летелица (антена, таласовода, итд.), делове авиона у ваздухопловству, војним и електронским компонентанама, итд. [30]

У ауто индустрији, композитни материјали са металном матрицом се највише користе због строгах захтева који се тичу потрошње горива. Изазов је био смањити тежину возила, а сачувати захтеве који се тичу удобности и сигурности потрошача. [33]

Један од типичних примера примене ових композитних материјала у ауто индустрији је у изради погонских вратила за аутомобиле. Неке од предности коришћења металних композита за израду погонског вратила су: отпорност на хабање, замор, високу

температурну издржљивост, малу густину као и ниску цену. На слици 33. је приказано вратило израђено од металних композитних материјала са алуминијумском матрицом.



Слика 33. Погонско вратило аутомобила, израђено од металних композитних материјала. [30]

Такође се користе још и за израду кочионих дискова, али углавном код тркачких аутомобила због своје високе цене. У односу на остале материјале, карактерише их и добра топлотна проводљивост, постојани су и на температурама од 500°C .

Због мале масе, густине као и доброг односа чврстоћа-густина ови материјали се користе за израду делова вештачких сателита, телескопа, итд. На слици 34. је приказан *Hubble Telescope (HST)*, чија је антена израђена од металних композитних материјала, са алуминијумском матрицом.



Слика 34. Hubble телескоп. [33]

У авио индустрији су доминантни полимерни композитни материјали, али код неких компоненти авиона метални композитни материјали иако су скуп, су незаменљиви, пример су млазни мотори високих перформанси. Метални композити се углавном

користе за израду млазних мотора због своје издржљивости на високе температуре, као и мале масе која подиже ефикасност авиона. Турбина једног таквог мотора је приказана на слици 35.



Слика 35. Турбина млазног мотора, изграђена од металних композитних материјала.
[34]

Композитни материјали са металном матрицом се такође користе и у спортској индустрији, за добијање делова бицикли, тениских рекета, палица за голф, итд. Такође примену налазе и у биомедицинској индустрији, за израду разних ортопедских помагала, због мале масе и густине.

6. Композитни материјали са керамичком матрицом

Керамика као материјал поседује изузетну чврстоћу као и топлотну стабилност, али један од недостатака керамике је њена кртост, у односу на већину материјала, због тога се керамика ојачава различитим врстама ојачања, као што су вискери, влакна, тканине, итд. [30]

Керамика има висок јунгов модул еластичности, веома високу тврдоћу, малу масу, високу температурну отпорност, отпорност на корозију и штетне хемијске утицаје. Неки од недостатака керамике су: ниска толеранција на оштећења, ниска дуктилност, ниска граница издржљивости на замор, који имају за последицу ограничење коришћења керамике као материјала матрице у неким напредним апликацијама.

Матрице се могу поделити у две групе [35]:

- Оксидна керамика- Al_2O_3 , SiO_2 , мулит ($3\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$), Ва-, Li и Са-алуминосиликати. Поседују бољу топлотну и хемијску стабилност.
- Неоксидна керамика- SiC , Si_3N_4 , BC , AlN итд. Имају боља механичка својства.

Као ојачања, могу да се користе континуирана и дисконтинуирана ојачања. Дисконтинуирана ојачања су углавном честице, вискери, сечени комадићи влакана (SiC , Si_3N_4 , BC , TiB_2 , AlN , итд.). Ова ојачања дају нешто нижа механичка својства, али се могу производити различитим типовима класичних поступака добијања конолитне керамике, што их чини јефтинијим. Као континуирана ојачања се користе углавном влакна као што су: Al_2O_3 , мулит ($3\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$), C , као и SiC . Континуирана ојачања су скупља, јер се добијају сложенијим поступцима, али зато дају боље механичке карактеристике.

Композитни материјали са матрицом од силицијум-карбида (SiC) имају високу топлотну проводљивост, малу пластичност на високим температурама, малу масу, добру отпорност на корозију и хабање. Као ојачања код овог типа матрица, користе се континуирана SiC или C влакна. Проблем код ових типова матрица и ојачања је њихово пријањање.

Док композитни материјали са матрицом од алуминијум-оксида (Al_2O_3), имају високу чврстоћу, тврдоћу, температурну стабилност, отпорност на хабање, отпорност на корозију на повишеним температурама, итд. Као ојачања за овај тип матрица се користе влакна од истог керамичког материјала, с'тим што се влакна превлаче одговарајућим материјалом, којим се смањује крутост. Неке од превлака су: угљеничне, BN , CeO_2 , ZrO_2 , итд.

6.1 Поступци производње

Својства композитних материјала са керамичком матрицом увелико зависе од њихове унутрашње микроструктуре и порозности, као и начина њихове производње. Оксидна керамика се сматра стабилнијом и развијенијом од неоксидне керамике, али ипак последњих година је дошло до развоја неоксидне керамике што је довело до њеног побољшања у карактеристикама као што су отпорност на штетне хемијске утицаје и корозију као и повећања чврстоће. [30]

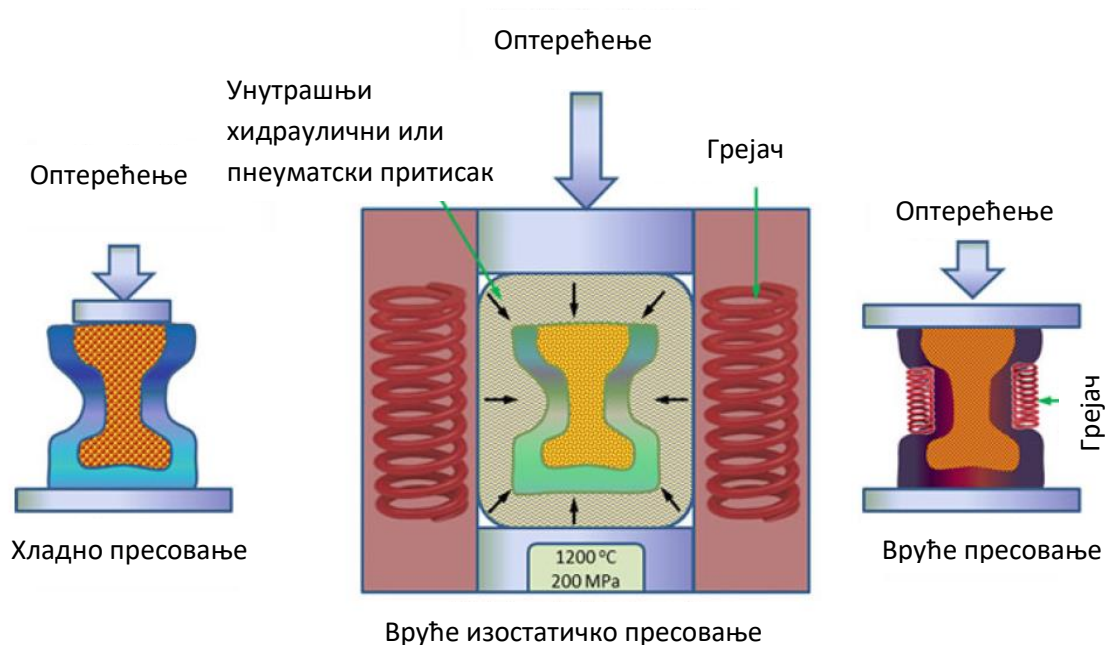
6.1.1 Поступци у чврстом стању

Поступци добијања композитних материјала са керамичком матрицом у чврстом стању су једни од најлакших и најјефтиних поступака. Постоји више примера добијања композита са керамичком матрицом у чврстом стању, неки од њих су: вруће

пресовање, вруће изостатичко пресовање, хладно пресовање, синтеровање, чврсто синтеровање, итд. [30]

Овим поступком, керамичке матрице могу бити ојачане честицама, вискерима или кратким влакнима, већина композитних материјала са керамичком матрицом се добија на овај начин. Последњих година, развијени су керамички композити са металним ојачањима (легурама титанијума и никла), који се користе за израду биомедицинских импланта, добијени су баш поступцима у чврстом стању.

На слици 36. је дат шематски приказ хладног пресовања, врућег изостатичког пресовања као и врућег пресовања.



Слика 36. Поступак хладног пресовања, врућег изостатичког пресовања и врућег пресовања. [30]

6.1.2 Сол- Гел поступак

Сол- Гел поступак, представља један од најстаријих и најјефтинијих поступака добијања композитних материјала са керамичком матрицом. Ова техника се користи за добијање матрице из течне колоидне суспензије финих керамичких честица (сол), која натапа предформу и затим претвара у чврсту супстанцу (гел). [30]

Колоидна суспензија настаје као резултат хемијске реакције, када се у течности (води или органском растварачу), таложе врло мале честице пречника до 100nm (наночестице).

6.1.3 Инфилтрација растопа

Поступак инфилтрације растопа (енг. *Melt infiltration*), је поступак код којег се материјал матрице у течном стању инфилтрира у предформу која садржи влакна. Влакна су пре инфилтрације прекривена слојем заштите у виду заштитних превлака. Поступак прераде влакана се састоји из два корака, први корак је обликовање влакана и наношење међуфазног премаза (бором нитридом, карбоном, итд) и затим превлачење влакана заштитним превлакама (SiC, Si₃N₄, итд). Међуфазни премаз се користи због бољег везивања матрице и влакана и тиме бољим преносом оптерећења, чиме се постижу боље механичке карактеристике. А заштитне превлаке се постављају да би се заштитила влакна од високе температуре истопљеног материјала матрице. [30]

Неке од предности овог поступка су: густина матрице, мања порозност композита, квалитетна заштита влакана, велика топлотна проводљивост, итд.

Постоји више варијација овог поступка неке од њих су:

- **Инфилтрација полимера и пиролиза** (енг. *Polymer Infiltration and Pyrolysis-PIP*)- Овај поступак се састоји из инфилтрације полимера ниске вискозности у ојачавајућу керамичку структуру, након чега наступа процес пиролизе (загревање полимерног прекурсора без кисеоника, након чега долази до разлагања полимера и долази до добијања керамичког композита).
- **Директна метална оксидација** (енг. *Direct Metal Oxidation-DiMOx*)- Овај поступак укључује формирање матрице из реакције истопљеног метала и оксидационог гаса. Влакна су постављена на површину истопљеног метала, око којих се налази оксидационо средство (кисеоник), истопљени метал у додиру са кисеоником оксидира, при чему се ствара танак слој матрице, који садржи неку количину ојачања. Истопљени метал пролази кроз порозни матрични слој, при чему се процес оксидације понавља и тиме повећава дебљина матрице.
- **Инфилтрација течног силицијума** (енг. *Liquid Silicon Infiltration-LSI*)- Овај поступак се користи за добијање матрице од силицијум-карбида. Процес подразумева инфилтрацију микропорозне предформе угљеника са истопљеним силицијумом, на температури која прелази његову тачку топљења (1414 °C). Течни силицијум натапа предформу угљеника, након чега помоћу капиларних сила испуњава порозну структуру, након чега се добија силицијум-карбид, помоћу реакције између истопљеног силицијума и угљеника у чврстом стању.

6.2 Примена композитних материјала са керамичком матрицом

Композитни материјали са керамичком матрицом налазе примену у: машинству, авио индустрији, ауто индустрији, биомедицини, војној индустрији, нуклеарној и нафтној индустрији, итд. [30]

Керамички композитни материјали који се користе у машинству морају да имају високу чврстоћу, жилавост, отпорност на хабање, низак коефицијент топлотног ширења. У машинству се користе углавном за израду алата за сечење, носећих делова, делова турбинског мотора, компоненти за ротациону опрему, лежајева, итд.

Будући да керамички композитни материјали задржавају своје механичке карактеристике под високим притиском, температуром, у различитим окружењима, као и што их карактеришу особине као што су ниска густина, чврстоћа на високим температурама, ватросталност и ниска топлотна проводљивост, ови материјали су погодни за коришћење у авио индустрији.

У авио индустрији се користе за израду: система за гориво и вентила, погонских јединица, горивих хелија, делова турбинског мотора, лежајева, заптивки, итд.



Слика 37. Млазна турбина израђена од композитних материјала са керамичком матрицом. [36]

Ови композитни материјали се такође користе и у аутомобилској индустрији, због набројаних карактеристика у изради топлотних мотора, компоненти погонског склопа, заптивки пумпи за воду, итд.

У војној индустрији се користе за израду: тенковских мотора, оклопа побољшаних карактеристика, компоненти за убризгавање горива, конструкција војних авиона и мотора. Неке од важних карактеристика материјала, који се користе у војној индустрији, које морају да испуне су: мала маса, висока специфична чврстоћа, отпорност на хабање, топлотна проводљивост, које композитни материјали са керамичком матрицом увелико поседују.

У биомедицинској и хемијској индустрији се користе за израду: вештачких импланта, рекуператора, измењивача топлоте, катализатора и упаљача, ватросталних материјала су неки од примена.

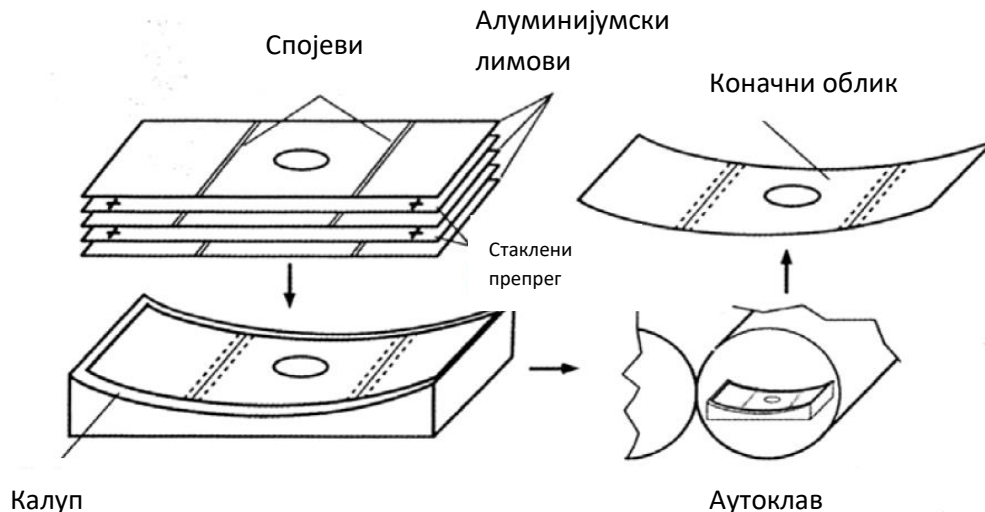
Такође примена постоји и у нафтној индустрији, где се ови материјали користе за израду лежачева, вентила за контролу протока, пумпи, рафинеријских грејача и експлозивних чаура.

7. Ламинирани (слојевити) композитни материјали

Слојевити композитни материјали, односно ламинирани су композитни материјали који садрже више слојева ојачања постављених у матрицу. Ови материјали су углавном анизотропни, али разлика карактеристика у различитим правцима није толико изражена као код композита са једносмерним влакнима. На основу овога, ови материјали обезбеђују најбоље карактеристике у правцу деловања оптерећења. Овим материјалима се такође остварује и уштеда на маси, који је важан фактор избора материјала у авио индустрији, где се овај тип композитног материјала углавном користи. [3]

Као што је већ напоменуто, слојевити композитни материјали се углавном користе у авио-индустрији, тачније "Glare" (енг. *GLAss-REinforced fibre metal laminate*) ламинати. Ови ламинати у себи садрже слојеве алуминијумског лима, додатно ојачане стакленим влакнима.

Шематски приказ добијања "Glare" ламината је приказан на слици 38.



Слика 38. Шематски приказ добијања "Glare" ламината. [3]

Постављањем препрега (тканина од стаклених влакана натопљена полимерном смолом) између алуминијумских лимова, добија се вишеслојна структура која садржи неколико редова ојачања. Након постављања влакана, лимови се међусобно спајају и након обликовања у калупу, новодобијени материјал се излаже високој температури и притиску (у аутоклав пећима) да би полимерна смола омекшала и након тога полимеризовала и чврсто везивала алуминијумске слојеве.

Механичка својства ових композитних материјала су условљена оријентацијом влакана у појединим слојевима, зато се на основу овога мора водити рачуна да оријентација влакана буде таква да имају највећу механичку отпорност у правцу деловања спољашњих оптерећења. "Glare" ламинате одликује значајно виша чврстоћа у односу на класичне алумијумске легуре, уз задржавање мале масе.

Још једна битна карактеристика ових материјала и отпорност на пукотине, односно у случају појаве пукотине на алуминијумским лимовима, стаклена влакна успешно савлађују пукотину тако што успорава или спречава њено ширење.

"Glare" ламинати су поприлично заступљени у изради делова авиона *Airbus A380*, тачније за израду горњих делова крила, бочних панела, оплате трупа авиона. Употребом ових материјала у конструкцији делова авиона, дошло је до смањења масе авиона за чак 30% у односу на стандардне алумијумске легуре. Поменути модел авиона је приказан на слици 39.



Слика 39. Airbus A380. [37]

Још један пример слојевитих композитних материјала је "Arall" ламинат (енг. *ARamid-ALuminum Laminate*), који садржи алуминјумске лимове који су ојачани арамидним влакнима натопљеним смолом.

7.2 Сендвич конструкције

Сендвич конструкције се састоје из два спољашња крута слоја између којих се налази материјал мале масе који чини језгро. Због мале масе, поседују високу специфичну чврстоћу и високу специфичну крутост. [3]

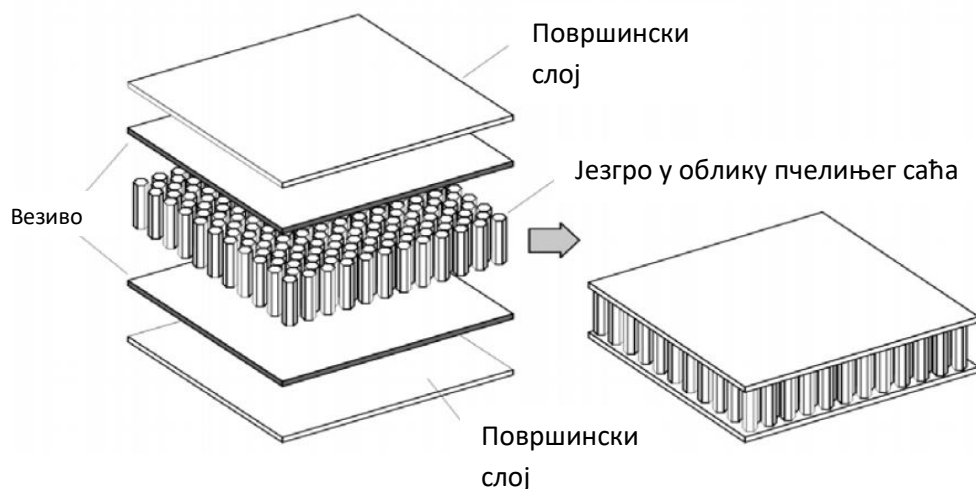
Површински слојеви су углавном изграђени од материјала веће чврстоће и крутости. Као материјали површинских слојева, користе се углавном легуре алуминијума, полимерни композити ојачани влакнима, титанијумове легуре и челик.

Као материјали језгра могу да се користе:

- Полимерне пене од: поливинил-хлорида (PVC), полистирена (PS), полиуретана(PUR), полиетермида(PEI), акрилне пене. Примењују се пене од 40 до 200 kg/m³ и дебљине између 5 и 50 mm.
- Алуминијум и полимерни композити (арамидна влакна у комбинацији са поликарбонантном (PC), полипропиленском (PP) или полиетиленском(PE) матрицом).
- Некада и дрво као што је балза или кедар.

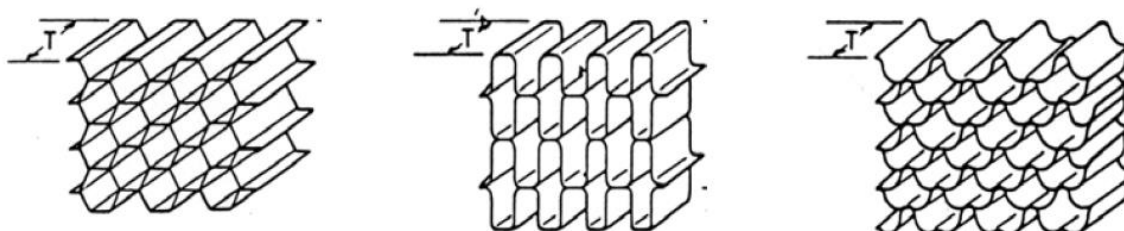
У авио-индустрији је веома битна структура сендвич конструкција у облику пчелињег саћа, која садржи алуминијумско језгро у облику танког саћа, које се налази између спољашњих слојева, најчешће алуминијумске фолије (лимова). На овај начин се добија

поприлично издржљив, крут, чврст и изузетно лаган композитни материјал. Шематски приказ поменутог материјала је приказан на слици 40.



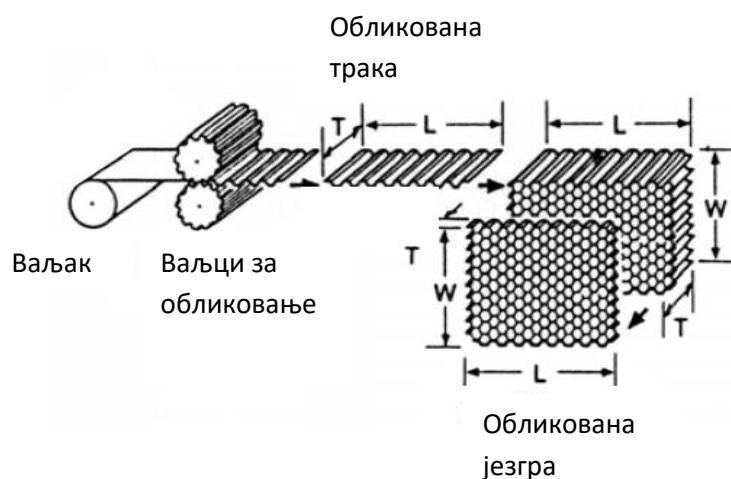
Слика 40. Композитни сендвичса језгром у облику пчелињег саћа. [3]

Да би се овакав вид композитног материјала добио, ваљане алуминијумске фолије се провлаче кроз ваљак за обликовање (профилисање) и тако обликоване спајају при чему настаје струкура са шестоугаоно профилисаним ћелијама. Осим класичног шестоугаоног профила ћелија, профили ћелија се могу израђивати и у другим облицима у зависности од начина профилисања. (слика 41)



Слика 41. Облици језгра композитног сендвичса. [3]

На слици 42. је приказан шематски приказ добијања алуминијумских језгара у облику саћа и њихово обликовње.



Слика 42. Шематски приказ добијања алуминијумских језгара у облику саћа и њихово обликовање. [3]

Композитни сендвичи са алуминијумским језгром у облику саћа се користе за израду компоненти авиона, који морају бити високе чврстоће, крутости али и мале масе. Око 100 оваквих сендвич конструкција је коришћено у изради авиона *Airbus A380*, углавном за делове авиона који спајају труп авиона и крила.

8. Закључак

Композитни материјали налазе широку примену у многим областима, као што су авио-индустрија, аутомобилска индустрија, биомедицинска и хемијска индустрија и многим другим областима. Њихова примена ће наредних година само да расте са развојем технологије и тиме потребе за неким новим видовима материјала, који ће моћи да лако да премосте изазове које нове и захтевне конструкције пружају.

Начини фабрикације за већину композитних материјала, последњих година нису ограничени само на израду изванредних материјала са високом ценом. Развојем технологије и све већом применом композитних материјала у свакодневним конструкцијама, доводи до тога да се производња композитних материјала све више прилагођава серијској и јефтинијој производњи.

Данас, у неким конструкцијама композитни материјали су незаменљиви као што је пример код израде млазних мотора високе перформансе, који морају да буду отпорни на високе температуре и издржљиви. Такође у космонаутици, код израде компоненти свемирских летелица, композитни материјали немају конкуренцију. Међутим поједини композитни материјали и нису заступљени у великом обиму примене, углавном због цене.

Композитним материјалима се такође може остварити и уштеда, као што је пример у аутомобилима. Коришћењем композитних материјала у аутомобилима, долази до смањења масе конструкције и тиме мање потрошње горива, што за резултат има економску уштеду као и смањење емисије штетних гасова. Такође разним поступцима прераде и уопште особина појединих материјала од којих се израђују композити, може доћи до развоја израде сложенијих облика крајњег производа.

9. Референце

1. Д. Адамовић, М. Јовановић, Б. Лазић, Н. Ратковић (2003): *Машински материјали*, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац.
2. Др. Момчило Стевановић (2002): *Влакнима ојачани полимерни композити: компоненте, структура, испитивање*, Партенон, Нови Београд.
3. Д. Ћорић, Т. Филетин (2010): *Материјали у зракопловству*, Факултет стројарства и бродоградње, Свеучилиште у Загребу, Загреб
4. Akovali G. (2001): *Handbook of Composite Fabrications*, RAPRA Technology LTD., Shawbury, Shrewsbury, Review Papers
5. Филетин Т., Марић Г. (2013): *Напредне Технологије Материјала*, Факултет стројарства и бродоградње, Свеучилиште у Загребу, Завод за материјале, Загреб
6. Преузето са: <https://netcomposites.com/news/htm-143-selected-for-new-space-and-satellite-applications/5879/>, приступ мај 2020.
7. Sp System Guide to Composites
8. *Wind Energy Fiberglass Fabrication*:
<https://www.vetrotextiles.com/applications/wind-energy>, приступ мај 2020.
9. Преузето са: <https://beetleplastics.com/uses-of-fiberglass-pipe-and-large-diameter-fiberglass-pipe/>, приступ мај 2020.
10. Преузето са: <http://www.madehow.com/Volume-4/Carbon-Fiber.html>, приступ јул 2020.
11. Преузето са: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/boeing-787-dreamliner>, приступ јул 2020.
12. Преузето са: <https://www.thoughtco.com/uses-of-carbon-fiber-820394>, приступ јул 2020.
13. Преузето са: <https://www.cnet.com/roadshow/news/2020-ford-gt-power-carbon-fiber-gulf-livery-chicago-auto-show/>, приступ јул 2020.
14. Mather, RR (2011): *Chemistry of Textile Fibres*, Royal Society of Chemistry, Chapter 6 High Performance Fibres.
15. Преузето са:
https://www.goodyear.com/images/tireImages/goodyear/media/Wrangler_All_Terrain_Adventure_Cutaway1_2732.jpg, приступ август 2020.
16. Преузето са: <http://www.wilderness-survival.net/reviews/safeguards-stealth-body-armor-kevlar-vest-review/>, приступ август 2020.
17. A. Baker, S. Dutton, D. Kelly (2004): *Composite Materials For Aircraft Structures*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Reston, Virginia.
18. Преузето са: <https://www.compositesworld.com/articles/boron-fiber-the-original-high-performance-fiber>, приступ август 2020.
19. H. Herring (2009): *Selected mechanical and physical properties of boron filaments*. Langly Research Center, National Aeronautics and Space Administration, Washington DC.
20. H. Spilker (2018): *Hi-Nicalon ceramic fiber*, COI Ceramics, Inc, Utah 84044.

21. Unidirectional Fabric: <https://netcomposites.com/guide/reinforcements/unidirectional-fabric/> , приступ август 2020.
22. Woven Fabrics: <https://netcomposites.com/guide/reinforcements/woven-fabrics/> , приступ август 2020.
23. Hybrid Fabrics: <https://netcomposites.com/guide/reinforcements/hybrid-fabrics/> , приступ август 2020.
24. Multiaxial Fabric: <https://netcomposites.com/guide/reinforcements/multiaxial-fabrics/> , приступ август 2020.
25. Преузето са: <https://www.eppcomposites.com/hand-layup-process.html>, приступ август 2020.
26. Преузето са: <http://hanloncomposites.com/spray-up>, приступ август 2020.
27. Преузето са: <https://www.thecompositeshub-india.com/filament-winding--a-cost-effective-composites-process> , приступ август 2020.
28. *Closed mold fabrication of Polymer Matrix Composites*: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=closed_mold_fabrication_of_polymer_matrix_composites , приступ август 2020.
29. Преузето са: https://www.researchgate.net/figure/Space-Shuttle-Orbiter-and-wing-leading-edge-cutaway-view_fig10_268475263 , приступ: септембар 2020.
30. Kamal K. Kar. (2017): *Composite Materials; Processing, Applications, Characterizations*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
31. *Liquid state fabrication of Metal Matrix Composites*: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=liquid_state_fabrication_of_metal_matrix_composites, приступљено: септембар 2020.
32. Prem Shankar Sahu, R. Bancchor (2016): *Fabrication Methods Used To Prepare Al Metal Matrix Composites- A Review*, International Research Journal of Engineering and Technology.
33. Преузето са: https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/story/index.html, приступ септембар 2020.
34. *The Future of Metal Is In Matrix Composites*: <https://www.machinedesign.com/materials/article/21835569/the-future-of-metal-is-in-matrix-composites>, приступ септембар 2020.
35. Антић Милица (2016): *Композитни материјали*, „Контрол Инспект“, д.о.о Београд
36. Преузето са: <https://www.smartershows.com/blog/2018/04/30/future-of-ceramics-matrix-composites-production-key-talking-point-among-senior-executives/>, приступ септембар 2020.
37. Преузето са: <https://www.aircraft-info.net/2014/05/airbus-a380/>, приступ септембар 2020.