

**Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Војна академија Универзитета одбране у Београду**



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство
Ниво студија: Основне академске студије
Модул: Конструкција пројектила и упаљача
Предмет: Машински материјали
Број индекса: 508/2012

Катарина Г. Љубовић

КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ
Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **др Нада Ратковић – ментор**
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог рада кандидат треба да спроведе одговарајућу, општег карактера анализу композитних материјала. То подразумева приказ основне структуре и карактеристика композитних материјала. Да прикаже детаљну поделу свих композита, са различитих аспеката поделе. Затим, да опише укратко поступке добијања композитних материјала. Такође, треба да представи примену у различитим областима индустрије. Посебан осврт треба да да рециклажи оваквих материјала.

Препоручена литература:

- 1) Милорад Јовановић, Вукић Лазић, Драган Адамовић, Нада Ратковић: Машински материјали, уџбеник, Машински факултет, Крагујевац, 2003.
- 2) др. сц. Вечеслав Бергман, проф. др. сц. Аднан Ћатовић, Данијел Фикет, др. стом.: Влакнасто ојачани композити и церомери у стоматологији, МЕДИХ бр. 52, Загреб, 2004.
- 3) Филетин, Т., Ковачичек, Ф., Индоф, Ј.: Својства и примјена материјала, Факултет стројарства и бродоградње, Загреб, 2002

Крагујевац, јун 2017.

Ментор:
др Нада Ратковић, доцент

Резиме

Овај рад обухвата опис и анализу композитних материјала. Композитни материјали су настали комбинацијом класичних материјала. У раду је приказано изналажење и развој нових композитних материјала. На основу основних подела композита могу се уочити неке заједничка својства које имају тако груписани композити. Да би се олакшала примена постојећих композитних материјала дат је и преглед досадашњих поступака њиховог добијања. Из истог разлога су дати примери примене композитних материјала у неким областима: у грађевини, медицини, ауто индустрији, авио индустрији као и у војној индустрији. На крају рада је дат приказ могућег даљег развоја, како нових тако и усавршавање постојећих материјала.

Кључне речи: композитни материјали, матрица, ојачивач, метали, полимери, керамике

Abstract

This paper includes the description and analysis of composite materials. Composite materials were created by a combination of classic materials. This paper presents the invention and development of new composite materials. On the basis of the basic division of the composite, some common characteristics of such grouped composites can be observed. In order to facilitate the application of existing composite materials, an overview of the previous procedures for obtaining them is given. For the same reason, examples of the use of composite materials in some areas are given: in construction, medicine, auto industry, aviation industry and military industry. At the end of the paper, we give an overview of possible further development of new materials and improvement of existing materials.

Keywords : composite materials, matrix, hardener, metals, polymers, ceramics

САДРЖАЈ

1. Увод	7
2. Хронологија развоја композитних материјала	8
3. Структура композитних материјала	9
4. Врсте и подела композитних материјала	11
4.1. Подела композита на основу ојачивача	11
4.1.1. Композити са честицама	14
4.1.2. Композити ојачани влакнима	15
4.1.3. Подела влакана	17
4.2. Подела композита на основу матрице	22
4.2.1. Метални композити ММЦ	24
4.2.2. Полимерни композити ПМЦ	26
4.2.3. Керамички композити ЦМЦ	30
4.3. Биокмозити	31
5. Својства композитних материјала	33
5.1. Метални композити ММЦ	37
5.2. Полимерни композити ПМЦ	38
5.3. Керамички композити ЦМЦ	39
5.4. Угљеник-угљеник композити	39
5.5. Хибридни композити	40
6. Добијање композитних материјала	42
6.1. Добијање композита са металном основом	42
6.1.1. Поступци у чврстом стању	42
6.1.2. Високотемпературска синтеза	43
6.1.3. Металургија праха	43
6.1.4. Поступци у течном стању	44
6.1.5. Ливење у калупу	44
6.1.6. Ливење мешањем	44
6.1.7. Ливење притиском	44

6.1.8.	Ливење у получврстом стању.....	45
6.1.9.	Инфилтрација метала под ниским притиском	45
6.1.10.	Спреј поступак	47
6.1.11.	Физичко таложење из гасовите фазе	47
6.1.12.	Брзо очвршћавање.....	48
6.2.	Добијање композита са полимерном основом.....	49
6.2.1.	Намотавање	49
6.2.2.	Ливење	50
6.2.3.	РТМ поступак	51
6.2.4.	Пултрудирање	51
6.2.5.	Напрскавање.....	52
6.2.6.	Ручно полагање	53
6.2.7.	Вакуумско спајање	54
6.2.8.	Препрег	55
6.2.9.	Инфузија слоја смоле	57
6.3.	Добијање композита са керамичком основом	58
6.3.1.	ЦВД напаравање	58
6.3.2.	Усмерена оксидација метала	59
6.3.3.	Производња SiC/SiC композита импрегнацијом полимера и пиролизом	59
6.3.4.	Инфилтрација истопљеног материјала	60
6.4.	Добијање угљеник-угљеник (C-C) композита	61
6.4.1.	Добијање C-C композита пиролизом чврсте масе	61
6.4.2.	Добијање C-C композита пиролизом течне масе.....	62
6.4.3.	Добијање C-C композита пиролизом гасовите масе.....	62
6.5.	Слојевити композитни материјали.....	62
6.6.	Сендвич конструкције.....	64
6.7.	Поступци производње биокомпозита.....	67
7.	Примена композитних материјала.....	68
7.1.	Примена композитних материјала у медицини	70
7.2.	Примена композитних материјала у аутоиндустрији	74
7.3.	Примена композитних материјала у авиоиндустрији	74
7.4.	Примена композитних материјала у војноиндустрији	76

8. Рециклажа композитних материјала	79
9. Закључак	84
Литература	87

1. Увод

Композити су материјали састављени из других, већ готових материјала, углавном као њихова мешавина, како би заједно имали нова својства, тј. она својства која сваки материјал сам не би имао. Састављени су из најмање два материјала (компоненте, фазе). Компоненте се међусобно не мешају нити растварају тако да се унутар композита јасно разликују две или више фазе.

Једна фаза се назива **матрица**, **основа** или **везиво** и она окружује и држи заједно групе влакана или фрагменте ојачивача.

Остале фазе у композитима се називају **побољшивачи** и њихов задатак је да побољшају хемијске и физичке особине (механичке, триболошке, електричне).

Побољшивачи који пре свега појачавају механичке особине (јачину, тврдоћу) називају се **ојачивачи**.

Још увек не постоји опште прихваћена дефиниција композитног материјала али се из гледишта науке и инжењерства може одредити као систем материјала који се састоји од смеше (комбинације) два или више макро или микро чинилаца (материјала) који се разликују по облику и хемијском саставу и који се не растварају један у другом.

Али, са друге стране, посматрано на атомском нивоу – већина савремених металних легираних материјала и полимера би се могли назвати композитним материјалима јер се састоје од одвојених и посебних атомских група. На микроскопском нивоу обичан конструкциони челик који садржи феритну и перлитну структуру би био пример композитног материјала јер ферит и перлит су посебно уочљиви чиниоци, односно фазе овог челика.

У инжењерском пројектовању под композитним материјалима се подразумева материјал који се састоји од чинилаца у опсегу микро-макро величина, с тим да преовлађује опсег макро величина.

Циљ је да се побољшају структурне, термичке, хемијске или неке друге карактеристике појединачних материјала.

У даљем делу рада ће бити дат историјски развој композитних материјала, неке од могућих подела композита, својства композитних материјала, начин њиховог добијања и примери примене композита.

2. Хронологија развоја композитних материјала

Употребу композитних материјала кроз историју можемо пратити још од времена древног Египта и Месопотамије око 2000 година пре нове ере. Још тада су биљна влакна најчешће влакна житарица, у комбинацији са муљем и блатом коришћени за израду грађевине.

Дрво представља природни композитни материјал целулозних влакана у матрици од лигнина.

Такође кост спада у природну мешавину калцијумових влакана који су спојени заједно у природној матрици.

Долази и напредак у војној сфери који треба поменути. У питању је монголијски композитни лук који је омогућио монголима освјање огромних територија. За овај монголијски лук може се рећи да је дуго био најмоћније оружје заслужено за овакву доминацију.

Кроз историју развој композита је имао значајну улогу али исто тако треба нагласити да развој композитних материјала креће тек у двадесетом веку, и то као резултат појаве пластике као што је винил, полиестер, полистирен и слично. Ови полимери се појављују почетком двадесетог века и долази до убрзања процеса производње и употребе композита а нарочито од раних педесетих година па на овамо.

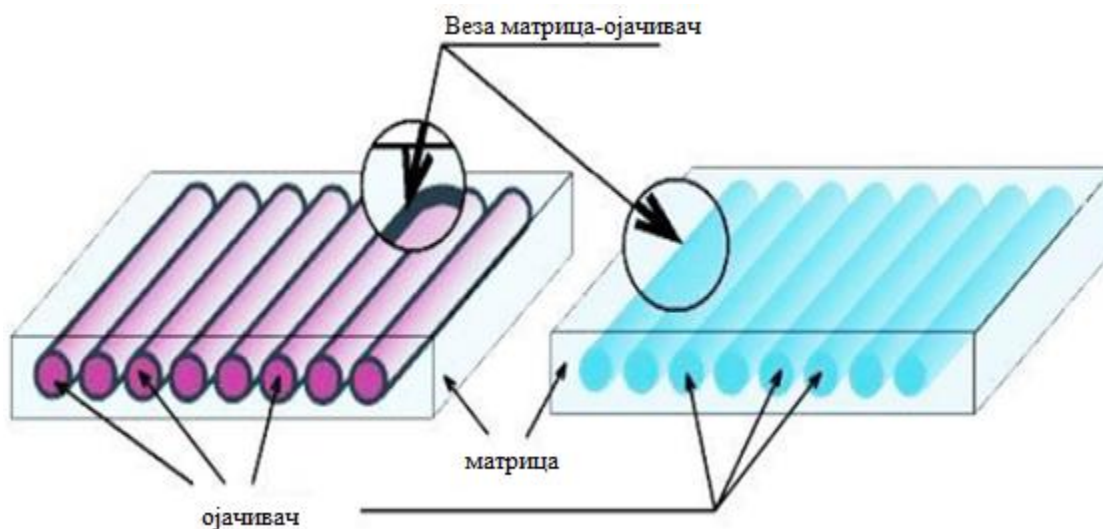
У том периоду почиње масовна примена у индустрији и то аутомобилској, војној, авио, хемијској, прерађивачкој, итд. Изузетни помаци су додатно узрок развоја свемирских технологија и аеронаутике.

3. Структура композитних материјала

Композитни материјали или укратко композити су вештачки спој два или више материјала различитих својства у циљу добијања материјала таквих својства каква не поседује ниједна компонента сама за себе.

Слика 1. приказује структуру композита који се састоји од:

- матрице и
- ојачивача.



Слика 1: Структура композита [1]

Композите можемо делити према врсти матрице и према врсти ојачања.

Укупно понашање композита одређено је на следећи начин:

- својствима материјала матрице и ојачала,
- величином и расподелом конституената,
- волумним уделом конституената,
- обликом конституената,
- природом и јачином веза између конституената.

Према врсти материјала **матрица** може бити:

- полимерна,
- метална,
- керамичка.

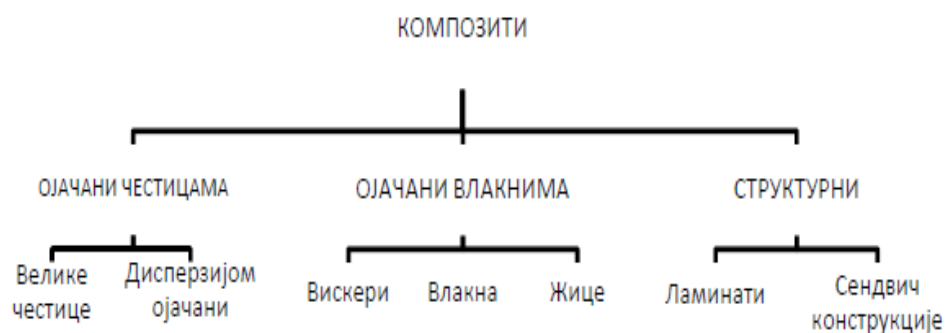
Према врсти ојачања могу бити у виду:

- честица,
- влакана,
- структурне компоненте.

4. Врсте и подела композитних материјала

Дакле композити су вештачки произведени вишефазни материјали који имају комбинацију конструкционих фаза. Једна фаза (матрица) је континуална и окружује остале (дисперзионе фазе). Задатак матрице је да повезује ојачиваче, штити од механичких оштећења (абразије) и штити од утицаја околине. Материјал матрице је дуктилнији у односу на материјал ојачивача и осигурава да у случају пукотина не би дошло до оштећења ојачивача. Од матрице често зависи највиша радна температура с обзиром да је материјал матрице мекши и да се разграђује при знатно нижим температурама него ојачивачи.

Ојачивач је компонента композитних материјала којој је задатак да зависно од врсте и распореда у матрици преноси оптерећења (сл. 2).



Слика 2: Подела композита према врсти ојачања [1]

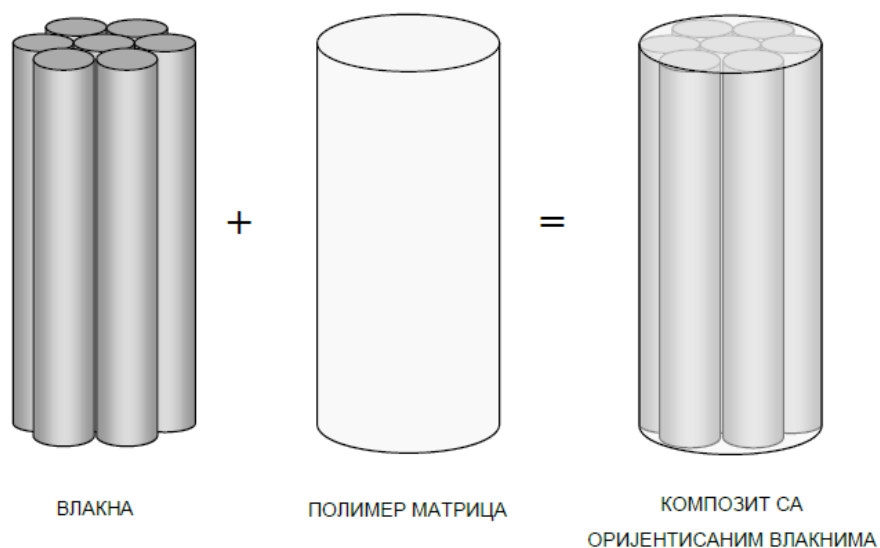
4.1. Подела композита на основу ојачивача

Влакна као саставни део полимерних композита имају функцију да повећају чврстоћу и крутост материјала матрице у циљу задовољавања одређених конструкцијских захтева. У принципу, влакна као носиоци оптерећења треба да буду што чвршћа и крућа. Због тога се за влакна преферирају материјали високе специфичне чврстоће и високе специфичне крутости.

Композити ојачани влакнима према врсти влакана могу бити:

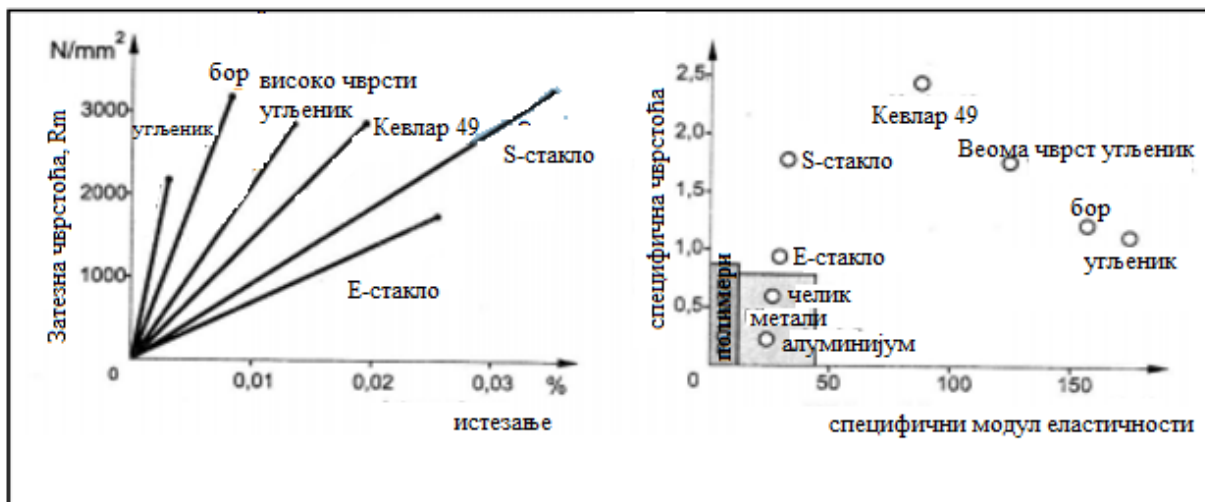
- композити са дисконтинуалним влакнима (имају случајно усмерена влакна),
- композити са континуалним влакнима (влакна могу бити усмерена у једном правцу, у више ортогоналних праваца или у више праваца који нису нужно ортогонална).

Композити ојачани континуалним влакнима спадају у анизотропне материјале с обзиром на то да су својства много боља у правцу пружања влакна.



Слика 3: Основне компоненте које чине композит са усмереним влакнима [1]

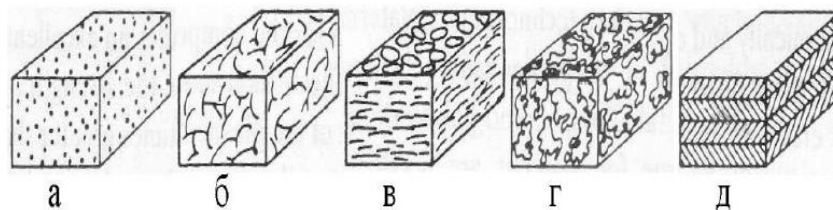
На слици 4 лево дат је дијаграм који показује зависност напон-деформација за различита влакна у односу на материјале од којих су направљена. Дијаграм десно (сл. 4) показује зоне у којима се налазе у односу на материјале од којих су направљене тј. специфичне вредности чврстоће и модула еластичности влакана.



Слика 4: Дијаграми чврстоћа неких влакана у зависности од материјала [1]

Посматрано у односу на микроструктуру грађе композита може се извести подела на :

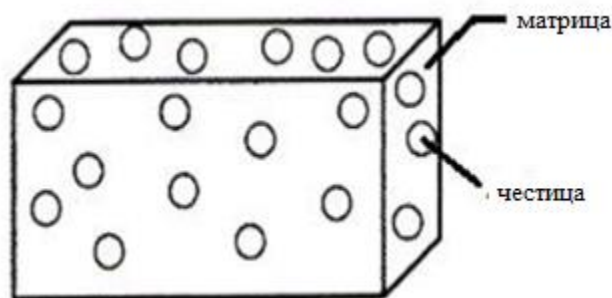
- композите ојачане дисперзним честицама,
- композите ојачане влакнима,
- композите ојачане љускама/плочицама,
- композите ојачане зрнима,
- композите ојачане тракама-ламелама.



Слика 5: Подела композита према грађи а)честице, б)влакна, в)љуске/плоче, г)зрна, д)траке-ламела [1]

4.1.1. Композити са честицама

Композити ојачани са честицама (слика 6) састоје се од матрице у којој су смештене честице различитог облика, али приближно истих димензија у свим смеровима. Величина и волуменска количина веома утичу на својства ових композита. Да би се постигло жељено ојачање честице треба да имају пречник мањи од $1\mu m$. Волуменски део честица износи од 30 до 40%.



Слика 6: Композити са честицама [1]

Примарни циљ композита са честицама је повећање отпорности на трошење и механичке отпорности при повишеним температурама.

Композити са честицама деле се на:

- композите са великим честицама и
- композите са дисперзијом.

Карактеристике честицама ојачаних композита су :

- висока отпорност на пузање,
- висока затезна чврстоћа на повишеним температурама,
- висока жилавост.

Бетон је пример композита са великим честицама који се састоји од мноштва честица које су међусобно повезане цементом. Композити са честицама се употребљавају и код алата израђени од тврдих метала (сл.7) где су керамичке честице распоређене у металној матрици. Примењује се и код плоча за резање и брушење, код електричних контаката, кочионих дискова и гума у аутомобилској индустрији.



Слика 7: Алати од тврдог метала [1]

4.1.2. Композити ојачани влакнима

Композити ојачани влакнима састоје се по правилу од високоефективна влакна која су уложена или везана на матрицу, а граница између њих је јасно одређена.

Код влакнима ојачаних композита долази до изразитог побољшања чврстоће, жиљавости, крутости услед уградње чврстих, крутих влакна у мекану матрицу. Влакна носе већи део оптерећења које материјал преноси, те осигуравају већу дуктилност и жиљавост.

Влакна требају да имају следећа својства:

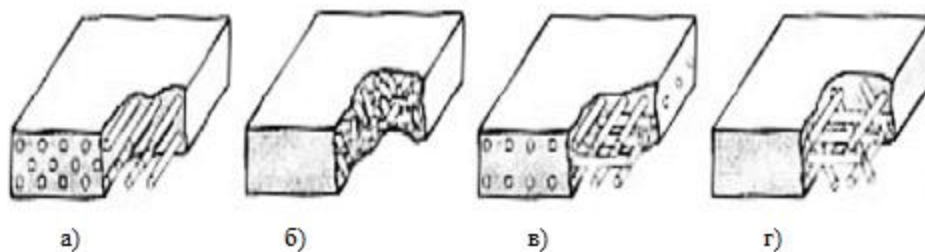
- високу затезну чврстоћу и крутост,
- треба да буду лагана и
- треба да имају високу тачу топљења.

Најчешћа полимерна влакана су стаклена, арамидна и угљенична влакна.

Влакнасти ојачивачи могу се поделити на:

- вискере,
- жице и
- влакна.

Расподела влакана битно утиче на својства влакнастих композита.



Слика 8: Различити начини распореда влакнастих ојачала [1]

На слици 8 приказани су различити начини расподеле влакнастих ојачала.

Под а-континуална једносмерна влакна, б- случајно усмерена дисконтинуална влакна, в- ортогонално распоређена влакна и под г- вишесмерно усмерена влакна.

Примена композита ојачаних влакнима: делови авиона, бродова, једрилица, тениски рекети (сл.9), риболовски штапови, лукови и стреле и заштитне кациге, итд.



Слика 9: Тениски рекет [1]

4.1.3. Подела влакана

Влакна по свом пореклу могу бити:

- органског порекла:
 - биљна:
 - влакна стабла: лан, јута, конопља,
 - влакна листа: сисал, абака,
 - влакна плода: памук, капак, кокос,
 - животињска: длака, вун, тетиве,
- неорганског порекла:
 - неорганска: метал, стакло, керамика, азбест,
 - синтетичка: полиестер, полиамид, акрил, полиолефин, спандекс/еластин/ликра,
 - рециклирано ојачана:
 - на целулозној основи: свилена влакна, вискозна влакна, целулозна влакна, бамбусова вискоза,
 - на протеинској основи: протеини соје, итд.

Када је реч о полимерним композитима они се најчешће ојачавају стакленим, угљеничним или араמידним влакнима.

1. **Стакло** је врло популаран материјал за ојачавање из неколико разлога:

- лако се извлачи из растопљеног стања у облику влакана велике јачине,
- економична је производња композита ојачана стаклом,
- уграђивањем чврстих стаклених влакана у полимерну матрицу добија се композит врло високе специфичне чврстоће,
- могућност комбиновања стаклених влакана са различитим полимерним матрицама чиме се постиже хемијска инертност и омогућује примена у корозивној средини.

Стаклена влакна су беле или прозирне боје, високе су чврстоће, али нису крута што делимично ограничава њихову примену. Подручје употребе стаклом ојачаних полимерних композита ограничено је температуром од највише 200°C. При вишим температурама већина полимера почиње да се деформише или долази до видљиве деградације својстава. За ваздухопловне примене користе се стаклена влакна високе чврстоће која у комбинацији са високотемпературском полимерном матрицом, као што су полиимидне смоле, могу поднети температуре до 300°C.

Стаклена влакна се производе најчешће од кварцног песка различитим поступцима и по правилу имају слабија механичка својства од угљеничних влакана. Врло су раширена у примени код механички мање захтевних конструкција због њихове мање цене. Могу се знатно разликовати по својствима те се означавају као:

- **А-стако** – оваква су била прва произведена влакна, данас се врло ретко користе, високо алкално, добра хемијска отпорност, слаба електрична својства,
- **С-стакло** – користи се због побољшане отпорности на киселине и базе,
- **Е-стакло** – најчешће коришћено, побољшана отпорност на влагу и блаже хемикалије, као и отпорност на утицај морске воде. Више од 50% свих стаклених ојачивача,
- **Ѕ-стакло** – повећане чврстоће и модула еластичности, користе се код механички оптерећенијих конструкција где је потребна висока специфична крутост и чврстоћа,
- **Д-стакло** – ниска диелектрична константа, лоша механичка својства,
- **Т-стакло** – употреба за температуре до 1050 °C, виша затезна чврстоћа R_m и модул еластичности E .

2. Осим стаклених влакана као ојачивачи могу се користити и **полимери и арамидна влакна** која су веома чврста и веома крута, врло доброг односа чврстоће и густине. Постоји више врста арамидних влакана која се разликују по механичким својствима.

Полимерна влакна су једина од набројаних која су у потпуности вештачки створена. Међу њима су најпознатија Кевларска влакна, а у последње време се користе и полиамиди због могућности коришћења и на повишеним температурама. Полимерна влакна се састоје од полимерних ланаца који се посебним поступцима издужују у правцу пружања влакана. Њихова својства су непосредна последица њихов микроструктуре. Будући да полимерни молекули стварају раванске површине велике крутости, који су међусобно повезане slabим водоничним везама, читав изглед влакна је врло сличан радијалном распореду код угљеничног влакна. Стога Кевларска влакна имају низак модул смицања у уздужном смеру, слаба својства у попречном смеру као и малу уздужну притисну чврстоћу, због slabих водоничних веза међу ланцима молекула. Са друге стране одликују их добра уздужна затезна чврстоћа, добра хемијска отпорност и топлотна постојаност, висока отпорност на хабање и мала густина.

Арамидна влакна чије име долази од ароматичних полиамида припадају групи пластомера, али за разлику од пластомера који се мешају и топе при повишеним температурама ова влакна су стабилна у подручју повишених температура. Арамидна влакна задржавају механичку отпорност при температурама од -200 до 200°C.

Влакна су карактеристичне жуте боје, хигроскопна, релативно слабе адхезионе везе са матрицом, скупња од стаклених влакана, немагнетична, осетљива на ултраљубичасто зрачење као и на деловање киселина и база, али су релативно инертна према другим течностима и хемикалијама. Осим тога позната су по својој крутости и жилавости, отпорности на удар, отпорности на пузање као и на појаву замора. Користи се за ткање платна (vlakна му нису крута), која су основна за израду многих отпорних љускастих елемената (шлемови, оклопи,...).

Арамидна влакна користе се за ојачавање фенолне матрице у изради структурних елемената авиона бомбардера као што су на пример врата отвора за бомбе која морају бити чврста, отпорна на удар и незапаљива.

3. Трећу групу влакнастих ојачивача чине **угљенична влакна** која се најчешће користе за ојачавање савремених полимерних композита. Разлози за то су следећи:

- угљенична влакна имају највећу специфичну крутост и највећу специфичну чврстоћу од свих влакнастих ојачивача,
- висок модул еластичности и високу чврстоћу задржавају и при повишеним температурама,
- влакна су отпорна на влагу и низ течности, киселина и база,
- развијени су релативно јефтини поступци производње влакана и композита.

Угљенична влакна по својој структури нису у целости кристална, већ се састоје од графитних и некристалних подручја која не садрже тродимензионални распоред атома угљеника у облику хексагоналне кристалне решетке карактеристичне за графит.

Прва угљенична влакна била су направљена из Rayon-а, али поступак је брзо избачен због малог постотка угљеника који се на тај начин добијао, као и због слабих механичких својстава.

Већина угљеничних влакана која се користе у авионским и другим конструкцијама су направљена из полиакрилонитрит влакана или из различитих смола процесом угљенификације, при чему се поступци производње могу значајно разликовати.

Према основним механичким карактеристикама, угљенична влакна се класификују као НМ (високог модула еластичности), НS (високе чврстоће) и ИМ (усмереног модула еластичности) – понекад се користи и ознака УНМ (врло висок модул еластичности).

Влакна добијена из смоле генерално имају већи модул еластичности, али и мању чврстоћу при сабијању и затезању. Ова влакна су и знатно више порозна, што додатно утиче на њихову чврстоћу. Влакна од смоле могу имати и добру електричну проводљивост, просечног су пречника 10-11 μm . У попречном пресеку, угљенична влакна могу имати радијални облик, облик концентричних слојева, трансверзално изотропни или језгро и спољашњу љуску.

Према крутости ова влакна се могу поделити у четири групе:

- стандардног модула еластичности (220 GPa),
- средњег или прелазног модула еластичности (240 GPa),
- високог модула еластичности (300 GPa),
- ултрависоког модула еластичности (450 GPa).

Угљенична влакна ултрависоког модула еластичности поседују највишу крутост од свих влакнастих ојачивача, а она средњег модула еластичности највише су чврстоће међу свим познатим влакнима.

За ојачавање се користе угљенична влакна пречника између 4 и 10 μm која могу бити континуална или резана. Влакна се уобичајено превлаче заштитним епоксидним слојем који побољшава адхезију са полимерном матрицом.

Композити угљеничног ојачања користи се за израду намотаваних кућица ракетних мотора као и бројних других конструкцијских елемената војних и комерцијалних летелица.

4. Осим стаклених, угљеничних и арамидних влакана, која су најчешћи ојачивачи полимерних композита, могу се користити и друге врсте као што су влакна бора, влакна на основу силицијум карбида (SiC) или она на бази алуминијум оксида (Al_2O_3). Композити са влакнима бора користе се у изради специфичних компонената војних авиона, али и за израду пропелера хеликоптера, док се SiC и Al_2O_3 влакна примењују у изради кућишта ракета.

Посебу скупину чине **борна влакна**. Ово су сама по себи композитна влакна будући да је посебним поступком напаравања бор нанесен на основно угљенично (израђени од смоле) или волфрамово влакно.

Борна влакна имају знатно већи пречник (125-140 μm) у односу на друге врсте влакана (угљенично пречника 10 μm). Због врло високе тврдоће бора, ови се композити врло тешко накнадно обрађују, што је уз високу цену, главни разлог што су их у ваздухопловним конструкцијама у потпуности истиснули композити са угљеничним влакнима. Борна влакна су се користила код првих авиона у којима су коришћени композити (амерички ловачки авиони F-14 Tomcat, F-15 Eagle из почетка 1970-тих). Касније је бор коришћен као једно од првих влакана у композитима са металном матрицом, при чему је матрица алуминијумска или титанијумска.

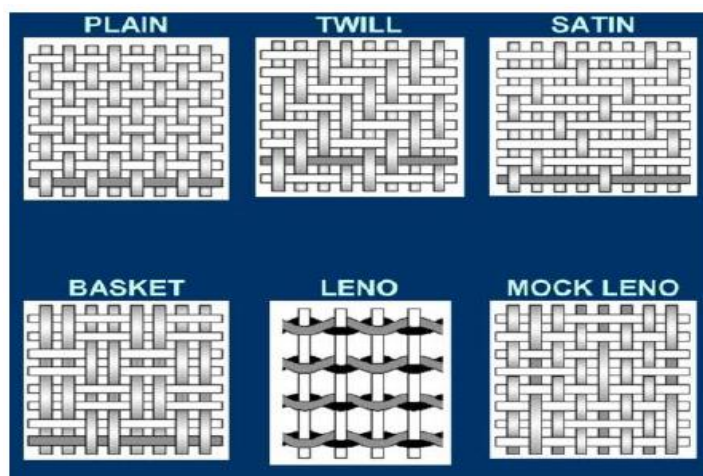
Влакна од силицијум карбида производе се сличним поступком као и борова влакна – напаравањем на језгру од угљеничног влакна. Ово су влакна посебно погодна за ојачавање метала као и ојачавање керамике у форми влакана од силицијум угљеника, силицијумовог нитрида или стакла.

У другом облику ова влакна се израђују од полимера који садрже силицијум и угљеник. Једно од таквих влакана познато је под трговачким именом Nicalon или у побољшаној верзији HI-Nicalon. Ова влакна имају и својства полупроводности – отпор им је завистан од количине нечистоћа које садрже.

Ницалон влакна су знатно јефтинија него влакна произведена CVD поступком али нису погодна за примене на вишим температурама.

5. Осим појединачним влакнима ојачавање се може остварити и различитим тканинама односно тракама направљених од влакана. Слојеви трака различито се усмеравају па у зависности од начина полагања и врсте ткања мењају се својства композита.

Ткање углавном представља начин преплитања нити под одређеним углом. Најчешће врсте ткања приказане су на слици 10. **Plain** – равно ткање, **Twill** – рибља кост ткање, **Satin** – савитљиво ткање, **Basket** – двонитно ткање, **Leno** – једнолично ткање око основе, **Mock Leno** – лажно једнолично ткање.



Слика 10: Неки од начина ткања [1]

Посебну врсту композита чини препрег код којих су плетена влакна натопљена матрицом. Препрег се по правилу користи за производњу композитних компоненти у аутоклаву (посебној комори са регулацијом притиска). Ова технологија је врло заступљена код производње композитних делова авионске конструкције.

4.2. Подела композита на основу матрице

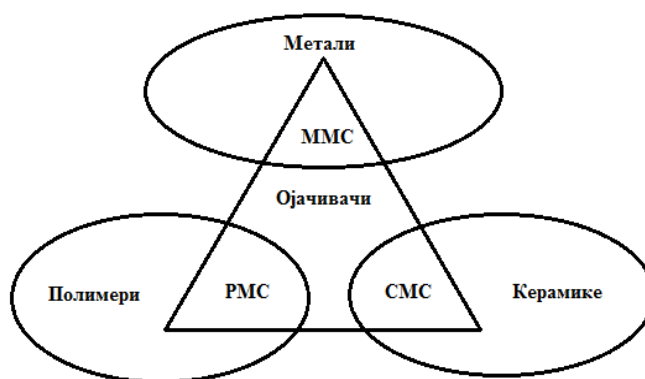
Улога и задатак матрице је:

- обједињава влакна и на њих преноси оптерећење, те обезбеђује облик, крутост и жилавост конструкције,
- мора бити довољно чврста како би допринела укупној чврстоћи композита,
- одваја појединачна влакна која се не могу самостално оптерећивати, те се на тај начин успорава ширење пукотине јер јер је спречено њихово напредовање између прекинутих влакана кроз цео композит,
- форми спољашњи облик композитне конструкције,
- осигурава заштиту ојачавајући влакна од хемијских утицаја и механичких оштећења,
- својом дуктилношћу полимерна матрица повећава жилавост композита,

Својства матрице изразито су важна за одређивање уздужне притисне чврстоће, попречне чврстоће као и међуслојне смицајне чврстоће и обично се каже да су ова својства условљена матрицом. У ваздухопловним конструкцијама, матрица мора бити отпорна и на погонско гориво, хидрауличне флуиде као и различите хемикалије које се користе при одржавању. За композите се тражи да добро подносе температуре до 150°C, изузетно и до 200°C. Својства матрице најчешће одређују и својства композита, као и ограничења у примени. У случају изложености композита хемијским или утицајима околине, матрица је она која је прва изложена смањењу механичких својства, њена својства значајно одређују понашање композита. Врло је битно физичко својство температура преласка у чврсто стање – ГТТ (енгл. Glass Transition Temperature - GTT) која дефинише тачку преласка из вискозног у чврсто стање матрице. Ова температура битно дефинише коначна својства матрице. При употреби изнад ГТТ, својства матрице знатно се снижавају. Влага у композиту (понајвише матрици) знатно снижава ГТТ. Технологија израде композита знатно утиче на његова својства, јер мора осигурати добру везу влакана и матрице као и минималан удео шупљина или пукотина у композиту.

Конституенти композита могу бити разнородни материјали: неметали, керамике и стакла, метали и легуре, полимери. У зависности од врсте конституената имамо:

- металне композите ММЦ,
- полимерне композите ПМЦ,
- керамичке композите ЦМЦ (слика 11).



Слика 11: Групе композитних материјала

Од њихових својства, заступљености, расподеле и везивања зависиће својства новонасталог материјала.

Својства матрице дата су у табели 1.

Све композите карактеришу неке заједничке одлике кије их чине посебним и издвајају од других материјала: велика јачина и крутост – могу бити јачи од челика, мала густина и маса, отпорност на корозију и високе температуре, хемијска постојаност, могућност обраде и обликовања у разноврсне облике, издржљивост и постојаност.

Табела 1. Физичка и механичка својстванеких материјала матрице [1]

Врста матрице	Густина	Истежање	Затезна чврстоћа	Модул еластичности	Модул смицања
	ρ [g/cm ³]	ϵ [%]	Rm [MPa]	E [GPa]	G [GPa]
Полиестер	1,50	5	90	4,5	2
Винил естер	1,15	5	90	4	-
Епокси	1,40	8,5	130	6	2,2
Бизмалеимид	1,32	6,6	78	3,6	1,8
Полиамид	1,89	3	120	4,9	-
Полиестер имид	1,27	60	105	3	-
Полиамид имид	1,40	12-18	95-185	5	-
PPS	1,34	3	70-75	3,3	-
Полиетеретеркетон	1,32	150	92-100	-	-
Полисулфон	1,24	50-100	70-75	2,5	-
Полипропилен	0,90	300	25-38	1-1,4	-
Поликарбонат	1,20	50-100	45-70	2,4	-
Алуминијум	2,70	-	200	70	-
Ti-6Al-4V	4,50	-	1000	110	-
Боросиликатно стакло	2,30	-	100	60	-
MgO	3,60	-	97-130	210-300	-
Al ₂ O ₃	4,00	-	250-300	360-400	-
SiC	3,20	-	310	400-440	-

4.2.1. Метални композити ММЦ

То су композити код којих је матрица метална (по правилу дуктилна). Као материјали матрице могу се користити разни метали попут суперлегура на бази никла и кобалта, титанових легура, као и лаких магнезијумових и алуминијумских легура посебно погодних у ваздухопловству. Ојачавањем металне матрице ојачивачима у облику честица, континуалних и дисконтинуалних влакана мењају се својства матрице и оно што је веома значајно повећава се специфична чврстоћа и специфична крутост и побољшава отпорност пузање.

Материјали континуалних влакнастих ојачивача могу бити угљеник, силицијумов карбид, бор, алуминијум и тврди метали, док се као материјали дисконтинуалних влакана користе угљеник и алуминијум. Значајна предност металних композита у односу на полимерне је могућност њихове примене при знатно вишим радним температурама. Међутим, ови композити су значајно скупљи од полимерних па је њихова употреба прилично ограничена.

Прерада композита са металном матрицом у начелу се састоји од најмање два корака. Први корак представља сједињење (уградња ојачивача у матрицу), а други је обликовање. У ту сврху развијене су многе методе од којих су неке прилично софисциране, док се метални композити са дисконтинуираним влакнима обликују уобичајеним поступцима као што су ковање, ваљање и екструдирање.

Композити са металном матрицом се могу поделити на:

- композити са алуминијумском матрицом
 - највећи удео на тржишту,
 - удео ојачања у матрици и до 70% - честице, вискери, кратка влакна, непрекидна влакна или нешто дебље нити,
 - значајно се повећава E до чак 240 GPa, чврстоћа, крутост, отпорност на трошење, снижава се топлотна растезљивост и до 70%,
 - честице: оксиди, карбиди или бориди.
- композити са магнезијумовом матрицом
 - Mg – мала густина (око 1700 kg/m^3),
 - Ојачање C-влакнима даје:
 - вишу крутост,
 - вишу чврстоћу,
 - лошу отпорност на корозију.
- композити са титанијумовом матрицом
 - изузетно висока механичка својства, врло добра отпорност при високим температурама и отпорност на корозију,
 - најчешће SiC влакна – у једном смеру.
- композити са бакарном матрицом
 - висока топлотна проводност ($>500 \text{ W/mK}$),
 - мало топлотно истезање ($4\text{-}70 \cdot 10^{-6}/\text{K}$),
 - Cu - матрица са C – влакнима или W – влакнима (за високе температуре),
 - инфилтрација текућег Cu између C– влакана, металургија праха и превлачење C –влакана са Cu.
- композити са матрицом од суперлегуре
 - суперлегуре Ni и Co+Mo, W, Ti и Al,
 - као ојачања се користе влакна од W, Mo, Ta и Nb,
 - примена при екстремно високим температурама (и до $1400 \text{ }^\circ\text{C}$).

4.2.2. Полимерни композити ПМЦ

Полимерни композити састоје се од полимерне смоле као матрице и ојачивача углавном у облику влакана. Типично садрже релативно чврста, крута влакна у дуктилној и жилавој полимерној смоли. Врло често композити стакленог и угљеничног ојачања садрже крута и чврста, али крта влакна уграђена у полимерну матрицу, која није углавном ни крута ни чврста.

Када је реч о полимерима, они се деле у две велике групе: дуромере и пластомере.

Дуромери при загревању стварају иреверзибилне хемијске везе међу полимерним ланцима који су међусобно снажно умрежени. При поновном загревању они не мењају стање, већ остају крути све док се под деловањем високе температуре потпуно не разграде. Ово указује и на велики проблем при њиховој примени, који је данас све важнији: није их могуће рециклирати размекшавањем матрице већ само механички уситнити чиме се добијају ситне грануле које у себи садрже и влакна и матрицу.

За разлику од њих, **пластомери** имају својство да се при хлађењу стврдњавају, али се при поновом загревању размекшавају те их је могуће поновно обликовати.

Ово омогућује поправљање делова који су израђени од ових композита, као и њихово делимично рециклирање. Код пластомера је могућа одређена кристалиничност, док су дуомери искључиво аморфни. Кристалиничност је узрокована усмереношћу ланаца.

Они делови полимера (или они полимери) који су кристалинични имају већу густину, али и боља механичка својства и отпорност утицају растварача (што је узроковано смањеном молекуларном активношћу, односно већом уређеношћу молекула).

Дуромери су полимери који се најчешће користе у производњи композита због релативно ниже цене, ниских производних температура, ниске вискозности при производњи и доброг квашења влакана. Од њих, за композите високих механичких својстава, у ваздухопловним конструкцијама најчешће су коришћења **епоксидне смоле** због лаког кориштења, ниске цене, због својих изврских механичких својстава, добре хемијске постојаности, задржавања добрих механичких својстава и димензија при повишеној температури и влази. Добро реагују (остварују добру адхезију) с већином врста влакана. Будући да при производњи пролазе кроз период врло ниске вискозности, то им омогућава врло широке технике производње. Епоксиди су најчешће двокомпонентни, при чему се у процесу производње додаје очвршћивач који постаје саставни део структуре матрице. Након мешања епоксида и очвршћивача, под деловањем топлоте долази до стврдњавања што се догађа неколико сати.

Коначна својства епоксидне матрице показују изразиту крутост, што доводи до знатне осетљивости обзиром на појаву пукотина. Да би се побољшала ова својства, као и отпорност на влагу и топлотна стабилност, данас се епоксидима додају еластомери као и други типови полимера.

Друга врста дуромера која се све више користи због отпорности на повишеним температурама јесу **адииони полиамиди**. Међу њима су најпознатији **бизмалеимиди (БМИ)** који поседују добре производне карактеристике но главни недостатак им је повишена кртост која се може смањити додавањем одговарајућих једињења (нпр. полисулфон, полиетеримид и др). Друге врсте ових једињења јесу **ПМР-15 полиимиди** са ГТТ од готово 300°C. **Цианати** су такође дуромери који су погодни за примену на високим температурама који имају ГТТ око 290°C. Одликују их добре карактеристике при примени у врућим и влажним условима (нешто слабије од епоксидне смоле) и висока тврдоћа. Врло су често коришћени и **незасићени полиестери**, најчешће у комбинацији са стакленим влакнима. Представник ових полимера су **винил естер** који је врло популарна због своје цене, отпорности на влагу, брзине и једноставности у изради композита.

Епоксидне смоле спадају у групу аморфних полимера које карактерише појава гумене (гел) фазе на вишим и стакласте фазе на нижим температурама. Епоксиди који полимеризирају на собној температури погодни су за коришћење на температурама до 50°C док се зависно од типа очвршћивача остале врсте епоксида обрађују на температурама између 120 и 180°C. Хемијске реакције које се при полимеризацији догађају јесу егзотермне па употреба велике количине очвршћивача (катализатора) или превисока температуре полимеризације може довести до топлотне деградације матрице, а тиме и самог композита. Ово је разлог због којег се посебна пажња мора посветити изради калупа, посебно ако је реч о дебљим или већим деловима.

Да би им се променила механичка својства, епоксидима се могу додавати различите материје у сврху смањења вискозности приликом обраде, повећања издужења уз смањење модула еластичности, побољшање отпорности ширењу пукотина, промена густине и др. Њихов основни недостатак је инхерентна (природно спојив, нераздвојив) кртост попраћена великом чврстоћом што се често побољшава додавањем пластомера. Главне предности епоксида јесу могућност подешавања својстава према постављеним захтевима, могућност контроле жилавости, лака и сигурна производња због мале количине штетних материја које се при томе ослобађају, мало скупљање, добра хемијска отпорност, добра димензиона и топлотна стабилност. Главни недостаци јесу виша цена производње у односу на нпр. полиестере (посебно специјалне врсте епоксида које се користе у ваздухопловству), осетљивост на влагу, споро полимеризирање, мала отпорност на нека органска једињења (нпр. органским киселинама и фенолима), релативно ниска температура примене.

Полиестерске смоле такође припадају дуромерима, а производе се егзотермним хемијским реакцијама при којим се незасићени полиестери мешају са релативно малом количином иницијализатора (катализатора). Као код епоксида, и овде материјал при полимеризацији прелази из течне, преко гел до чврсте фазе. Главне предности ових материјала јесу мала почетна вискозност, мала цена полазних сировина, једноставна производња, отпорност атмосферским утицајима. С друге стране, полимеризација је врло егзотермна с високим скупљањем чиме се у процесу производње уносе значајна заостала напрезања, кртост, слаба хемијска отпорност нека једињења (алкалима).

Винил естери су по својствима између епоксида и полиестера. Полимеризација се догађа на релативно ниским температурама (као код полиестера) а коначна својства дају добру хемијску отпорност, као код епоксида, уз једноставну производњу, боља механичка својства и боље везе између влакна и матрице у односу на полиестере. Ови материјали имају знатно веће трошкове производње него полиестери, знатно веће скупљање у односу на епоксиде.

Фенолне смоле настају полимеризацијом фенола уз помоћ нпр. формалдехида под посебним условима. Ови полимери исказују добру отпорност високим температурама као и отпорност горењу, која је последица аблативних својстава ових смола (при горењу изгарају слојеви материјала одређеном брзином стварајући слој угљеника) што им и јесте највећа предност при употреби. Недостаци су високи притисци при производњи потребни за полимеризацију као и велик број шупљина што знатно снижава механичка својства.

Бизмалеимиди (БМИ) су високо умрежени полимери, по производњи врло слични епоксидима, иако могу имати нижу вискозност и боље квашење влакана. ГТТ им је између 180 - 320°C док је максимална температура при којој се могу користити до 150°C. Ови су материјали изворно крути што се побољшава помоћу адитива. У односу на епоксиде, предност им је знатно боља топлотна стабилност што је важно у ваздухопловној примени код борбених авиона високих перформанси који лете великим брзинама и на великој висини.

Бизмалеимиди који се користе код ових конструкција имају ГТТ око 180°C, мада се не препоручује њихова употреба на температурама изнад 125°C, посебно у условима повећане влаге. Основни недостатак је знатно виши трошкови производње у односу на епоксиде. Данас БМИ композити у ваздухопловним конструкцијама све чешће замењују композите са угљеничном матрицом.

Полиимидне смоле имају предност врло високе температурске примене коју нема ни једна друга врста полимера, будући да им је ГТТ између 200-400°C. Зависно од технологије производње, могу бити и дуромери (адицијски полиимиди), као и пластомери (кондензацијски полиимиди).

Процеси производње су често врло комплексни јер укључују високе температуре и притиске па захтевају строго праћење параметара процеса како не би дошло до стварања експлозивних материја. Технологија производње укључује употребу препрега или РТМ (RTM - Resin Transfer Molding). У ваздухопловним конструкцијама користе се за кућишта млазних мотора или за конструкционе елементе ловачких авиона високих перформанси. Најквалитетнији од ових полимера имају ГТТ већу од 270°C, процесну температуру од преко 370°C, дуготрајну топлотну стабилност и изврсна механичка својства. Основна предност им је стабилност и одлична механичка својства на високим температурама, високог квалитета произведених компоненти, отпорност према већини хемикалија, док је недостатак цена и сложеност производње.

Цианатне смоле полимеризирају помоћу катализатора релативно брзо при температурама 170-250°C и са врло малим скупљањем. Након полимеризације, карактеристике су добра чврстоћа и тврдоћа на повишеним температурама, врло мало упијање влаге, иако дуготрајна изложеност влази узрокује смањење својстава, што им представља проблем за коришћење у ваздухопловним конструкцијама.

Пластомери су најшире класификовани као аморфни и кристалинични, мада сви испољавају кристалиничност у већој или мањој мери. Кристалинични еластомери показују знатно бољу отпорност утицајима горива, хидрауличких флуида и др. у односу на аморфне.

Аморфни пластомери показују велику испреплетеност полимерних ланаца, а при загревању те се везе раскидају и полимер се понаша као вискозни флуид. Аморфни пластомери су и у одређеној мери осетљиви на разређиваче, па су знатно осетљивији на пузање и заморна оштећења него кристалинични. Пластомери су знатно мање склони упијању влаге, мање су осетљиви на ударна оштећења. Могу се у ограниченој мери поправљати поновним загревањем и заваривати. Но, температуре и притисци на којима полимеризирају су знатно виши у односу на дуромере.

Кристалинични пластомери својство кристалиничности поседују због веће или мање усмерености полимерних ланаца, мада комплетну кристалиничност није могуће постићи. При загревању, кристалиничне се фазе мешају и матрица постаје аморфни, вискозни флуид.

Ови су полимерни у ствари семикристалинични будуће да садрже и кристалиничну и аморфну фазу. Производни услови битно утичу на степен кристалиничности - што је већа брзина хлађења кристалиничност је мања.

Поликетони су група кристалиничних пластомера који имају изврсну топлотну отпорност. Међу њима се истичу полиетеркетон (ПЕК), полиетеркетонкетон (ПЕКК) па најчешће коришћени полиетеретеркетон (ПЕЕК). ПЕЕК има степен кристалиничности до 40%, добра механичка својства, отпорност према разређивачима и киселинама са изузетком концентрисане сумпорне киселине. Основни недостатак је врло висока цена производње. Пластомери могу бити произведени знатно брже јер повишену температуру није потребно одржавати дуже време. Неки од њих имају знатно вишу ГТТ, затим температуру примене од епоксида или бизмалеимида. Код пластомера је уочљиво течење и знатна деформација при лому, тиме и знатно већа жилавост. Но, они испољавају и пузање при повишеним температурама и константним оптерећењем.

Полифенилен сулфид (ППС) је високо кристалинични полимер (степен кристалиничности до 60%) са одличном топлотном стабилношћу, хемијском и ватроотпорношћу што га чини атрактивним материјалом (и допуштеним, према ФАА) за авионске интеријере. Материјал задржава добра својства и на температурама до 200°C када почиње поступно смањивање механичких својстава.

Полимери базирани на дериватима сулфона - **полисулфон (ПСУ)**, **полиетер сулфон (ПЕС)** и **полиарил сулфон (ПАС)** су аморфни, генерално доста хемијски отпорни, али не свим разређивачима, и имају изузетно добра својства на високим температурама и ватро отпорност. Задржавају добра механичка својства и у условима повишене температуре и влаге. Самогасиви су, при чему се ствара врло мала количина дима.

Полиетеримид (ПЕД) је аморфан еластомер високих механичких својстава. Димензионо је стабилан (због аморфне структуре), има изражено мало скупљање и високо изражену изотропију у упоређивању са већином кристаличних полимера. Висока ГТТ омогућава коришћење на температурама до 200°C. Хемијски је врло отпоран на велики број хемикалија и на атмосферске утицаје. Примену му ограничава врло велика вискозност у растопљеном стању.

4.2.3. Керамички композити ЦМЦ

Керамички композит садрже керамичку матрицу додатно ојачану честицама или вискерима. За ојачавање се користе честице цирконијум оксида (ZrO_2) или алуминијум оксида (Al_2O_3) односно силицијум карбида (SiC) и силицијум нитрида (Si_3N_4) ако је реч о вискерима.

Керамички композити се према саставу могу поделити на:

- неоксидну керамику: SiC , Si_3N_4 , BC , AlN . Нешто боља механичка својства,
- оксидну керамику: Al_2O_3 , SiO_2 , Ва-, Li- и Са- алуминосиликати. Нешто боља топлотна и хемијска стабилност.

Керамика је опште позната као материјал отпоран на пузање који задржава добру механичку отпорност при високим температурама, док је њен основни недостатак склоност кртом лому због изразито ниске ударне жилавости у односу на метале што се покушава превазићи развојем савремених керамичких композита. Уградњом честица или вискера једног керамичког материјала у матрицу од друге врсте керамике ударна жилавост се може повећати и до 10 пута. То се постиже међуделовањем припадајуће пукотине и ојачивача при чему честице или вискери спречавају ширење пукотине. Опште је познато неколико техника за заустављање или успорење ширења пукотине. У случају керамичких композита ојачаних честицама цирконијум оксида успоравање је последица напрезања индуковане фазне трансформације честица ZrO_2 у непосредној близини пукотине што резултује појавом напрезања под притиском при чему се пукотина затвара.

Код композита ојачаних керамичким вискерима успорење се заснива на заобљавању врха пукотине, премештавању пукотине, апсорбовању енергије током затезања при чему се вискери одвајају од матрице или долази до прерасподеле напрезања у ивичним подручјима пукотине. Предност керамички ојачани вискерима у односу на неојачане керамичке материјале је и у знатно мањем расипању чврстоће материјала. Осим тога, тако ојачани керамички композити изузетно су отпорни на појаву пузања и топлотне шокове узроковане наглим променама температуре.

Композити са керамичком матрицом производе се поступцима врућег пресовања, врућег изостатичког пресовања и синтеровања.

Керамички композити се примењују за механички и триболошки оптерећене делове изложене високим радним температурама ($>1600^\circ\text{C}$) као на пример поједини делови мотора.

4.3. Биокмозити

Биокмозити су композитни материјали сачињени од:

- природних влакна (биљног или животињског порекла),
- синтетичких (вештачких) влакана и биополимера (настали прерадом биљака),
- од природних влакана и биополимера који су уједно и еколошки најповољнији композити и често се називају зелени композити.

Када се упореде са широко коришћеним стакленим влакнима, биљна влакна одликују се многим предностима, која су утолико вреднија јер се постижу без знатне промене или губитка механичких и акустичних својстава. Нижа цена већине биљних влакана један је од важнијих, ако не и главни разлог преласка на композите пуњене тим влакнима. Биљна влакна показују већу сигурност у случају судара јер се не ломе. Добри су акустични изолатори због шупље ћелијске структуре. Из истог су разлога такви композити и добри изолатори. Биљна влакна се лакше режу и слабије су абразивна према опреми за прераду од стаклених влакана. За разлику од стаклених влакана не утичу негативно на здравље корисника. Будуће да су пољопривредни производи, до биљних влакана се лако долази и доступна су у целом свету.

ПРЕДНОСТИ:

- обновљиви извори,
- лака доступност,
- ниска цена и мали удео утрошка енергије током производње,
- сигурнија за руковање и производњу у односу на синтетичка влакна,
- висока електрична непроводљивост,
- добра звучна изолација.

НЕДОСТАЦИ:

- тешко распршљиви у матрици,
- природна влакна су хигроскопна – упијају влагу,
- влакна почињу деградацију у распону од 90 до 200°C, па су температура обраде и избор материјала матрице ограничени,
- осетљиви су на труљење/деградацију из окружења,
- димензије влакана и механичка својства варирају од биљке до биљке,
- садња биљака за израду ојачивача смањује земљишта за садњу прехранбених сорти.

Зашто желимо користити природна влакна:

- предности су веће од недостатка,
- природна влакна ће у будућности бити замена за стаклена влакна,
- унапређења су потребна на повећању механичких својстава али и стабилности својстава, како би могли имати примену у конструкцијски,
- природна влакна су обновљива и рециклирајућа.

5. Својства композитних материјала

Могући однос матрица-ојчивач даје могућност да се композитни материјали прикажу и на начин дат у табели 2.

Табела 2. Однос материјала матрице и ојчивача [2]

		МАТРИЦА			
		<i>метална</i>	<i>полимерна</i>	<i>керамичка</i>	<i>угљенична</i>
О Ј А Ч И В А Ч	<i>метални</i>	метално-метални	полимерно-метални	керамичко-метални	угљенично-метални
	<i>полимерни</i>	метално-полимерни	полимерно-полимерни	керамичко-полимерни	угљенично-полимерни
	<i>керамички</i>	метално-керамички	полимерно-керамички	керамичко-керамички	угљенично-керамички
	<i>угљенички</i>	метално-угљенични	полимерно-угљенични	керамичко-угљенични	угљенично-угљенични

Композит општи назив добија према имену матрице. Уопштено посматрано својства композита зависе од:

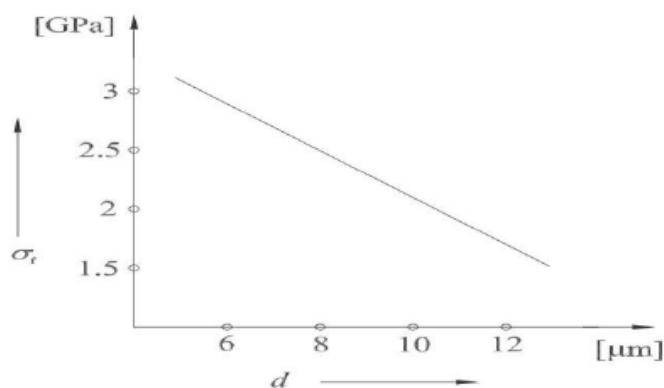
- својства конституената тј. матрица и ојчивача,
- величине и расподеле конституената,
- запреминског удела конституената,
- облика конституената,
- природе и јачини веза између конституената.

Упоредне физичке и механичке карактеристике композитних материјала дате су у табели 3.

Табела 3. Упоредна својства композитних материјала [2]

Својство	Композити		
	метални	полимерни	керамички
Густина [g/cm^3]	2-16	1-2	2-17
Температура топљења [$^{\circ}C$]	200-300	70-200	2000-4000
Топлотна проводљивост	висока	ниска	средња
Топотно издужење	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

Висока механичка својства влакана резултат су снажних међуатомских сила које владају у материјалима ниског атомског броја и мале густине. Влакна могу бити направљена или само од тих елемената, затим од њихових међусобних веза, или спојева са кисеоником и азотом. Код ових материјала није изражено пластично течење, као код метала, већ се лом догађа услед интегралног ефекта деловања микроскопских пукотина чији се број смањује што су мање димензије влакана.

Слика 12: Утицај пречника влакана d на чврстоћу σ_f [2]

Материјал у влакнастој форми стога, има врло малу запремину по метру дужине, те је вероватноћа појаве пукотине обрнуто пропорционална запремини материјала.

Испитивањем је показано да са повећањем пречника влакана чврстоћа композита опада и обрнуто (сл.12)

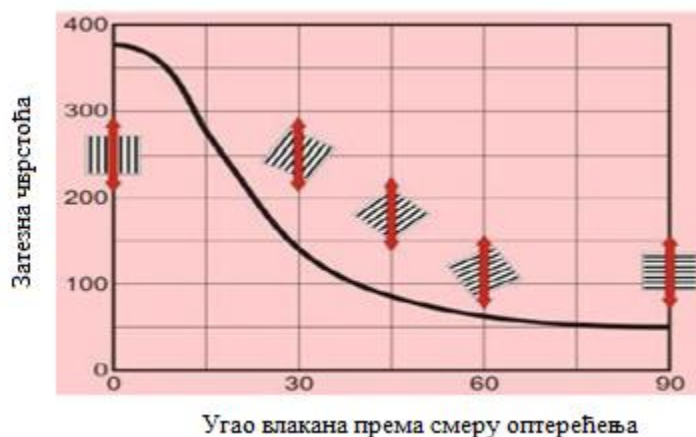
Са друге стране, код оваквих материјала је знатно више изражено одступање својстава од референтних вредности. Ова неуједначеност механичких својства представља велики проблем при прорачуну и изради композитних конструкција. Број микроскопских пукотина може бити знатно смањен технологијом израде влакана или заштитном превлаком око влакана.

Поступци који у себи укључују извлачење или вучење, због затезних напрезања у влакну имају позитиван утицај на усмереност кристала или структуре у правцу влакана.

Карактеристике композита са влакнима у великој мери зависи и од дужине влакана (сл. 13) и о угла правца под којим делује оптерећење у односу на правац влакана (сл. 14). На слици 13 је дат пример код епоксидне матрице са Е стакленим влакнима.

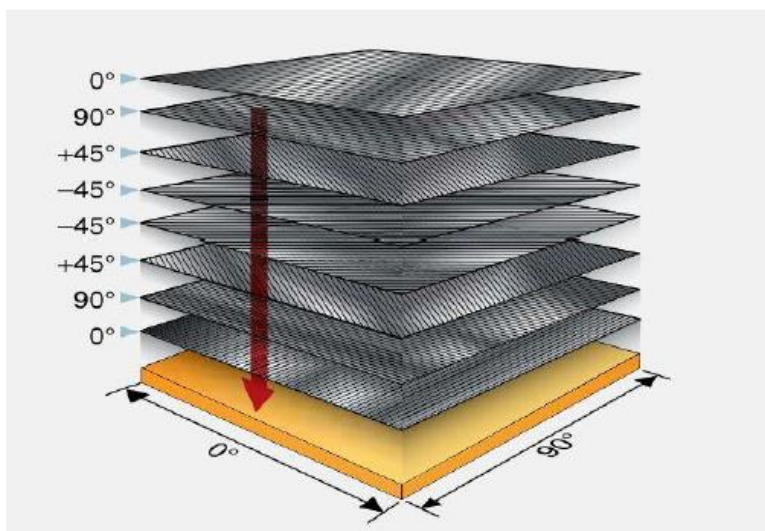


Слика 13: Однос затезне чврстоће и дужине влакана (епоксидна матрица са 50% Е стаклених влакана) [2]



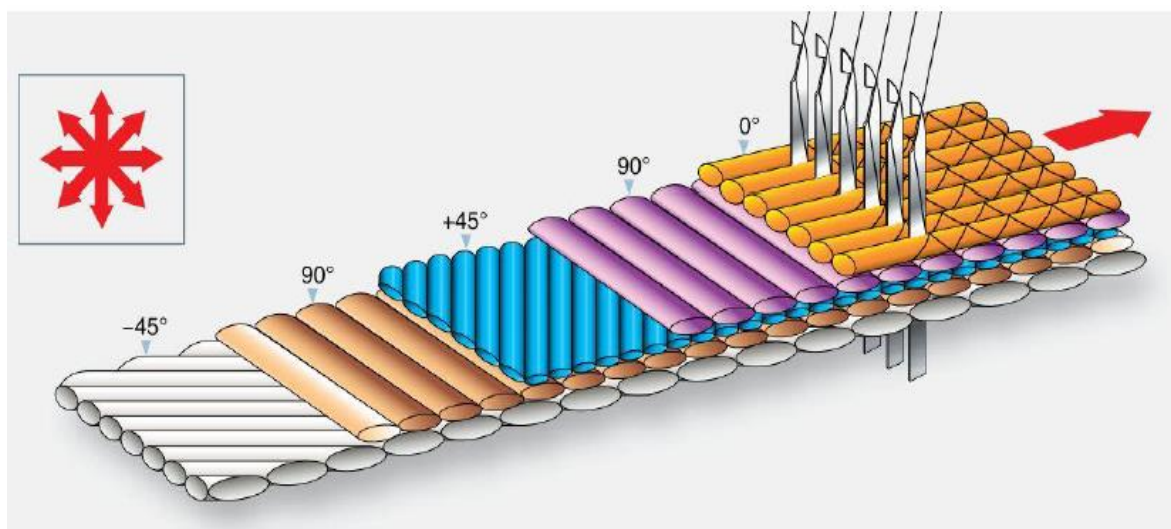
Слика 14: Однос затезне чврстоће и угла влакана према смеру оптерећења (еполсидна матрица са 50% Е стаклених влакана) [2]

Како би се избегла појава различитости својстава композитних материјала у различитим угловима оптерећења врши се стварање тзб „квази изотропског материјала“ на тај начин што се слојеви усмереног ојачивача слажу под различитим угловима (слика 15).



Слика 15: Квази 2D изотропски ламинатни (слојевити) материјал [2]

Исти ефекат квази изотропског материјала се код разнослојних материјала може постићи на тај начин што се различито усмерени разнородни слојеви повежу проширењем посебним нитима и на тај начин изврши „уједначавање“ потребног својства (сл.16).



Слика 16: Квази 2D изотропски разнослојни материјал [2]

5.1. Метални композити ММЦ

Метални композити се означавају:

A / B / X p – I

A	- матрица
B	-ојачивач
Xp	-удео
I	- врста

Al 6061 / Al₂O₃ / 20p / T6

Al / Nextel 610 / 45f (Re = 1200 MPa)

Матрице: суперлегуре, легуре алуминијума, магнезијума, титана и бакра.

Ојачивачи: честице, дисконтинуална влакна и вискери (сецкана влакна од угљеника и алуминијума и честице алуминијума и угљеника, дијаманти), континуална влакна (угљеник, бор, алуминијум и тврди метали).

Предности:

- врло висока чврстоћа и крутост уз врло малу густину,
- висока топлотна и електрична проводљивост и ниска термичка проводност,
- врло добра отпорност на хабање,

Недостаци:

- сложена производња,
- врло висока цена – цена ће падати са ширењем примене,
- недовољно података о својствима материјала,
- још увек нема довољно смерница за конструисање овом врстом материјала,
- лоша рециклажност.

Садржај влакана у % као и нека својства ММЦ дати су у табели 4.

Табела 4: Карактеристике неких ММЦ композита [2]

Влакно	Матрица	Запремински удео влакна	ρ	Rm
		%	kg/m ³	N/mm ²
С влакно	Al-легура 6061	41	2440	620
Влакно бора		48	-	1515
SiC		50	2930	1480
Al ₂ O ₃	Al-легура 380,0	24	-	340
С влакно	Mg-легура AZ31	38	1830	510
“Borsic”	Титан	45	3680	1270

5.2. Полимерни композити ПМЦ

Полимерни композити ојачани стакленим влкнима – GFRP

Стаклена влакна:

- лако се производе,
- хемијски су отпорна,
- GFRP – до температуре од 200°C због полимерне матрице.

Употреба GFRP:

- аутомобилска индустрија,
- бродоградња,
- танкери.

Полимерни композити ојачани угљеничним влакнима – CFRP

Угљенична влакна:

- високи специфични модул и специфична чврстоћа чак и на високим температурама,
- пречник влакана: 4-10 μm ,
- премазан са епоксидном смолом за осигурано лепљење са матрицом

Употреба:

- авионски делови,
- кућишта ракетних мотора,
- спортски реквизити.

Полимерни композити ојачани арамидним влакнима – AFRP

Арамидна влакна:

- пластомерни материјал,
- висока затезна чврстоћа, слаба чврстоћа на притисак,
- механички стабилан од -200 до 200°C,
- није отпоран на јаке киселине и базе.

Употреба:

- заштитна одећа (панцирни прслуци),
- спортски реквизити.

5.3. Керамички композити ЦМЦ

Предности:

- стабилност на екстремно високим температурама,
- отпорност на топлотни шок,
- изузетна отпорност на корозију,
- велика тврдоћа,
- мала маса.

Недостаци:

- склоност кртом лому.

Решење: керамичка матрица + керамички ојачивачи.

У табели 5 приказане су карактеристике ММЦ.

Табела 5: Карактеристика ЦМЦ композита: SiC матрица са SiC континуалним влакнима [2]

Густина	kg/m^3	2100
Притисна чврстоћа	MPa	450
Затезна чврстоћа	MPa	262
Отпорност на смицање	MPa	34
Модул еластичности	GPa	96
Топлотна проводљивост	$10^{-6} l/K$	2,7
Термичка проводност	$W/(mK)$	1,32

5.4. Угљеник-угљеник композити

Угљеник-угљеник композити су, како и само име говори, композитни материјали у којима су матрица и ојачивач од угљеника. Реч је о релативно новим и врло скупим материјалима. Разлог високе цене је у врло сложенем поступку производње којим се чиста угљенична влакна уграђују у поролизирану угљеничну матрицу.

Изразита својства ове групе композита су:

- пре свега висок модул еластичности и висока затезна чврстоћа,
- отпорност пузању,
- релативно висока ударна жилавост,
- висока топлотна проводљивост.

Њихов основни недостатак је склоност ка оксидацији при високим температурама ($>450\text{ }^{\circ}\text{C}$). Из тог разлога потребна је заштита од оксидације која се постиже:

- модификацијом матрице додавањем различитих инхибитора оксидације. Инхибитори могу бити B, Si, Zr,
- наношењем керамичких превлака (најчешће вишеслојне превлаке карбида, нитрида и оксида Si, Zr, Ta, Al).

Примењује се у ракетним моторима и конструкцијама савремених војних авиона.

5.5. Хибридни композити

Хибридни композити се добијају употребом више врста влакана, као ојачивача у јединственој матрици. Велика предност оваквих композита је знатно боља комбинација својстава, него што је то код композита ојачаних само једном врстом влакана. Постоје разне комбинације влакана и матрица, али ипак најчешће се користе угљенична и стаклена влакна у полимерној матрици. Угљенична влакна имају релативно високу чврстоћу и крутост и ниску густину, али и високу цену која често ограничава њихову примену. Насупрот њима стаклена влакна имају лошија механичка својства, али им је цена знатно повољнија. Комбиновањем споменутих влакана добија се композит веће чврстоће и жилавости, и релативно повољне цене. Због великог броја начина слагања влакана у матрици, својства ових композита могу бити веома различита. Тако, на пример, влакна могу бити усмерена у једном смеру или орјентисана у различитим смеровима, ламинати се могу слагати из различитих правцу при чему је сваки слој састављен од другог типа ојачивача. Значајна примена хибридних композита сусреће се код авиона Боинг где се користе за израду конструкцијских елемената оплате. У табели 6 наведени су неки примери хибридних композита и њихова својства.

Табела 6: Својства хибридних композита [2]

Композити са угљеничним и арамидним влакнима	• добра жилавост и чврстоћа на затезање од арамида, • добра притисна и чврстоћа на затезање од угљеничних влакана, • ниска густина али релативно висока цена.
Композити са арамидним и стакленим влакнима	• мала густина, добра жилавост и чврстоћа на затезање од армида, • затезна и чврстоћа на затезање од стакла, • ниска цена.
Композити са угљеничним и стакленим влакнима	• добра притисна и чврстоћа на затезање, крутост и ниска густина од угљеничних влакана, • ниска цена.

6. Добијање композитних материјала

6.1. Добијање композита са металном основом

Поступци добијања композита могу се поделити на примарне и секундарне.

Примарним поступцима композити се добијају синтеровањем од материјала матрице и ојачивача. Ојачивач се уграђује у матрицу на потребним местима и у потребним количинама, при чему се стварају потребне везе.

Секундарни поступци су сви остали поступци за прераду примарног композита у готов производ. У зависности од коначног производа (облика, састава, жељених особина) и примењеног начина производње оба поступка се могу одвијати истовремено.

У општем случају поступак добијања композита зависи од начина инфилтрације фазе ојачивача, као и према врсти и облику фазе ојачивача. Механичке карактеристике, хемијски састав матрице и ојачивача (дебљина и дужина влакана, начин слагања и размештај влакана, величине, облика и распореда честица) одређују избор поступка производње. Потребно је познавање термодинамичких процеса и могућих реакција матрица-ојачивач, радне температуре, ради избора оптималног поступка производње композита.

Многи ојачивачи и матрице нису компатибилни и не могу се прерадити у композите без прилагођавања њихових својстава. Постоје композити где је веза ојачивач-основа слаба и неопходно ју је ојачати. Са друге стране треба избегавати прекомерну активност на међуграници (која може ослабити карактеристике материјала у додиру) – посебно код реактивних саставних елемената. Решење се постиже адекватном површинском обрадом, превлаком ојачивача или прилагођавањем састава матрице.

6.1.1. Поступци у чврстом стању

Ови поступци се одвијају при нижим температурама, где постоји могућност боље контроле термодинамичких процеса. Главни поступци за добијање композита у чврстом стању су дифузно спајање материјала у облику танких слојева и синтеровање.

Процеси наношења матрице у којима се материјал матрице наноси на влакно, укључује електрохемијско привлачење, плазма спреј поступак и физичко таложење из гасовите фазе. После процеса наношења одвија се дифузно спајање на повишеној температури и високом притиску.

Степен дифузије мора бити ограничен због могућег пораста нежељених кртих фаза на контактної међуповршини. Један од начина ограничавања дифузије је истискивање слоја влакана и матрице кроз алат. Такође се може применити и топло ваљање, при чему се деформације морају ограничити како би се спречило померање влакана ојачивача и избегла оштећења. Повишене температуре се користе ради олакшаног течења матрице, али се мора избећи прекомерно загревање које може довести до хемијске реакције влакана. Недостатак ових поступака је што захтевају чисте површине пре покушаја самог спајања. Неопходно је претходно чишћење самог материјала и одвијање поступка у вакууму.

6.1.2. Високотемпературска синтеза

Високотемпературска синтеза топлим пресовањем је релативно јефтин и једноставан процес којим се могу производити композити са малом порозношћу и тродимензионалном структуром између интерметалних слојева и металних матрица. Истовремено дејство притиска и реакције синтезе омогућују смањење порозности произведеног материјала и контролу геометрија пора као и равномерну расподелу честица у металној матрици.

6.1.3. Металургија праха

Металургијом праха се остварује повезивање праха са честицама, плочицама или вискерима ојачивача. Два (или више) праха се мешају, понекад и уз помоћ везива. Керамичке честице које треба да осигурају високу чврстоћу композита су реда величине $5\mu m$, док је градијација праха легуре матрице (алуминијум или магнезијум) од $20-40\mu m$. Разлика у величини честица прахова омогућава стварање непрекинуте мреже малих керамичких честица око већих зрна матрице. Тако настају многоструко нехомогена подручја. Стварањем мреже настала порозност се мора попунити растопљеном легуром матрице током попуњавања (топло пресовање). Ако полазни прах лако оксидише, врло фини субмикронски оксиди могу се концентрисати на границама зрна значајно смањујући жилавост изворног материјала. Поступак обухвата: просејавање брзо очврслих честица, спајање честица са фазом или фазама за ојачање са или без везива, очвршћивање смеше ојачивача и матрице на око 75% густине, истискивање гаса и завршно сједињавање истискивањем, ковањем, ваљањем или неком другом топлим обрадом.

Технологијама металургије праха могуће је добити много различитих композитних материјала са металном основом врхунског квалитета. Висока цена производње, међутим, ограничава примену ових технологија.

6.1.4. Поступци у течном стању

Ради што бољег повезивања матрице и влакана пожељно је да растоп из матрице тече у међупросторе влакана да би се остварило његово потпуно прекривање. За такав поступак користе се дубоке купке које значајно олакшавају производњу а које се у индустрији употребљавају за припрему производа. Квашење влакана и избегавање превелике хемијске реакције између влакана и матрице захтевају претходну обраду истих, превлачењем, нпр слојем титан диборита у случају алуминијумских ММЦ-а.

6.1.5. Ливење у калупу

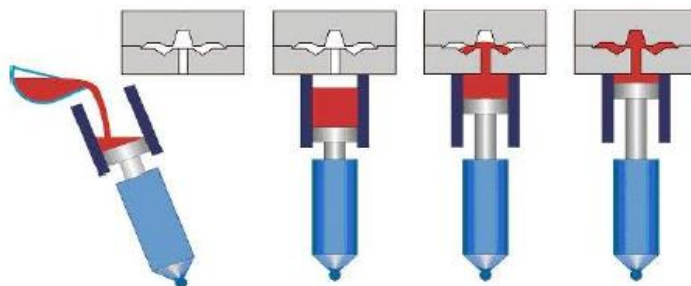
Ово је најчешћи од свих ливачких поступака и користи се за производњу велике количине делова уз најнижу цену. При томе се користе различити начини припреме растопа и технике ливења.

6.1.6. Ливење мешањем

Ливење мешањем слично је класичном поступку код алуминијумских легура, али уз благо мешање растопа ради постизања равномерне расподеле. У циљу избегавања прегрејавања и накнадног стварања карбида потребно је стална контрола температуре растопа.

6.1.7. Ливење притиском

Овај поступак је приказан на слици 17.



Слика 17: Ливење притиском [3]

Ливење притиском подразумева утискивање порозне керамичке форме у прегрејан калуп, који ће се касније испнити течним металом. Помоћу притиска течни метал улази у керамичку форму при чему настаје чврст композит. Током овог поступка долази до истовременог очвршћавања основе уз остваривање чврсте граничне површине ојачивач-основа. Предност описаног поступка је у томе што се добија компактан композитни материјал минималне порозности. Поступак смањује утрошак материјала и енергије производећи делове завршне мере и нуди способност селективног ојачавања елемената.

6.1.8. Ливење у получврстом стању

Ливење у получврстом стању је поступак где се метална основа у фази процеса у којој се одвија инфилтрација ојачивача у металну основу налази у получврстом стању. Овај поступак добијања композитних материјала је сличан ливењу мешањем, са разликом што се честице мешају у метал који је у получврстом стању. Потребно је снажно мешање получврстог материјала, а не благо као код ливења мешањем. Проблеми који су се јављали при коришћењу металне основе у течном стању довели су до пораста интереса за истраживањем начина добијања композитних материјала са металном основом у получврстом стању.

6.1.9. Инфилтрација метала под ниским притиском

Инфилтрација метала под ниским притиском је поступак у власништву фирме Ам Линксајд, познат под различитим заштићеним именима.

Првим развијеним поступком композити се производе инфилтрацијом слоја честица Al_2O_3 растопљеним металом који је изложен оксидационој атмосфери. Материјал матрице насталог композита је састављен од смеше продуката оксидационе реакције и неоштећене алуминијумске легуре. Овим поступком добијају се готови облици и својства комозита који могу задовољити одговарајуће специфичне намене.

Овом поступком производи се материјал који се касније може претапати и користити у ливницама за производњу делова од алуминијумске ММЦ. Поступак обухвата инфилтрацију алуминијума у масу керамичких честица за ојачање, што је приказано на слици 18.



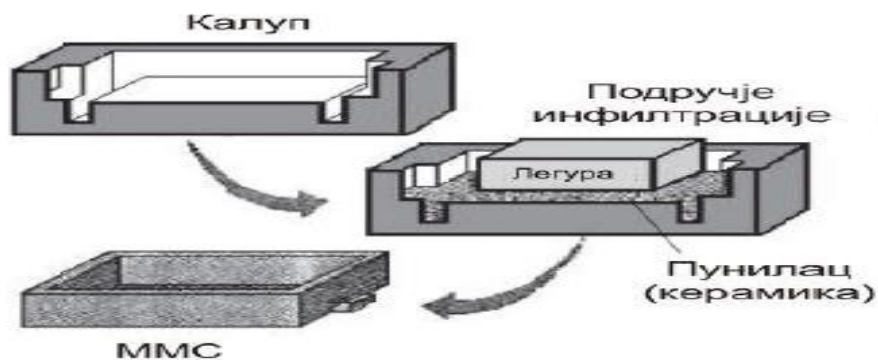
Слика 18: Шема производње ММЦ-а Primex инфилтрацијом [3]

Долази до стварања јединствене површинске превлаке на честицама ојачивача чиме су омогућени поступно „квашење“ честица и повољни услови за течење растопа ради даље ливачке употребе.

Економично се могу производити делови завршног или облика свих величина као и делови сложеног облика.

Значајна примена овог поступка је у производњи делова за електронске компоненте од SiCp/Al композита (сл. 19). Могу се испунити типични захтеви:

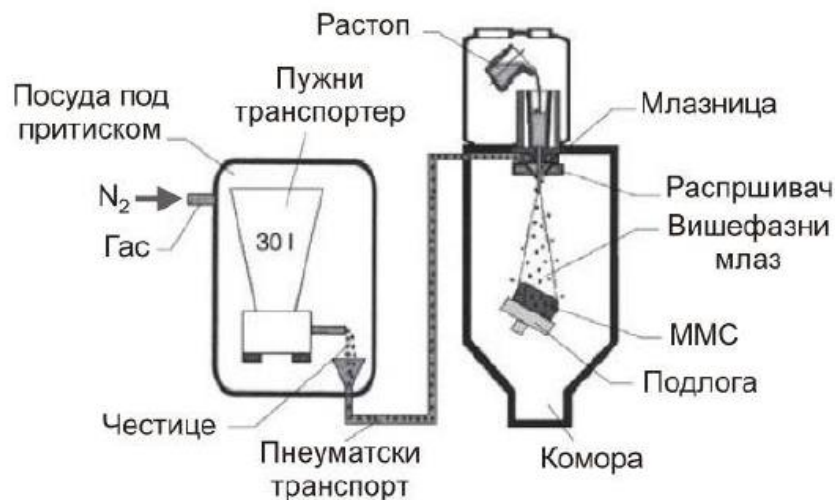
- мали коефицијент термичког ширења,
- висока топлотна проводљивост ради смањења деформација,
- мала густина за постизање минималне тежине производа,
- смањење цене и повећање поузданости у односу на класичне методе израде електронских компоненти.



Слика 19: Шема производње електронског елемента инфилтрацијом [3]

6.1.10. Спреј поступак

Спреј поступак укључује атомизацију растопа (стварање засебних капљица), бризгање капљица растопљеног метала кроз дизне и скупљање и очвршћавање получврстих капљица на одговарајућој подлози. Шематски приказ овог поступка дат је на слици 20.



Слика 20: Шема спреј поступка [3]

Оваквим поступком метална легура се топи индуктивним загревањем и излива у загрејану посуду. Растоп тече према гасном распршивачу. Гасни млаз велике брзине распршује метал у ситне капљице које се снажно убрзавају према подлози. На подлози капљице очврсну и стварају талог формирајући тако приближно коначне облике. Брзина очвршћавања није тако велика, чиме се постижу две предности:

- директна производња предходних облика и
- директно укључивање ојачивача у припадајућу матрицу.

ММЦ инготи се лију увођењем честица за очвршћавање у метални млаз. Потребно је пажљива контрола услова дозирања да би се осигурала равномерна расподела честица.

6.1.11. Физичко таложење из гасовите фазе

Физичко таложење из гасовите фазе обухвата низ поступака укључујући испаравање електронских снопова. Таложење и електропревлачење су поступци којима се производе композити узастопним наношењем слојева матрице на влакна ојачивача. ПВД технике захтевају много мање загревање влакана од инфилтрације растопљеним металом. Температуре површине су обично испод 200°C.

6.1.12. Брзо очвршћавање

На величину зрна композита добивених ингот технологијом може утицати растојање између честица, ако је пораст зрна онемогућен сударањем честица. Код метала осетљивих на пораст зрна коначна величина зрна понекад је превелика – што погоршава механичке карактеристике материјала. Због тога се при развоју низа инжењерских легура користио поступак брзог очвршћавања за постизање жељене микроструктуре.



Слика 21: Поступак брзог очвршћавања [3]

Микроструктура ових легура карактерише се уједначеним саставом, уситњеним микро саставним елементима, високим степеном презасићености и задржаним метастабилним фазама. Три су начина коришћења брзог очвршћавања у производњи композита:

- атомизација,
- добијање трака и
- добијање листића.

Последњи начин је најперспективнији јер довољно велика брзина очвршћавања омогућава добијање листића дебљине 40-60 μm . Листићи добијени овим начином широки су и дуги 6-8 mm и имају мали однос запремина/површина. Листићи се могу директно сјединити у композитни производ без даље промене величине. Траке захтевају даљу обраду ради смањења величине, што може довести до запрљаности и оксидације.

Поступак брзог очвршћавања приказан је на слици 21.

6.2. Добијање композита са полимерном основом

Влакнима ојачани композити полимерне матрице могу се произвести различитим методама, од којих су најчешће: намотавање, ливење, РТМ поступак, полтрудирање, напрскавање, ручно полагање, вакуумско спајање.

6.2.1. Намотавање

Намотавање је поступак при којем се континуална влакна која служе као ојачивач намотавају на модел тако да обликују шупљи део (сл. 22). Влакна се најпре воде кроз течност која садржи смолу, а затим се континуално намотавају на цилиндрични модел, често применом аутоматизоване опреме за намотавање. Постоји више типова намотавања:

- навртањем,
- прстенасто и
- поларно

од чега зависи и механичка својств. Након наношења низа слојева следи отврдњавање у пећи или при собној температури, након чега се модел одстрањује. Као алтернатива могу се намотавати танки сводови. Намотавањем се постиже врло висок однос чврстоће и густине као и високи степен оријентисаности влакнама.

Уобичајне намотаване конструкције су оплате ракетних мотора, резервоари и др.



Слика 22: Приказ намотавања филамената, прстенастог и поларног намотавања [3]

Предности:

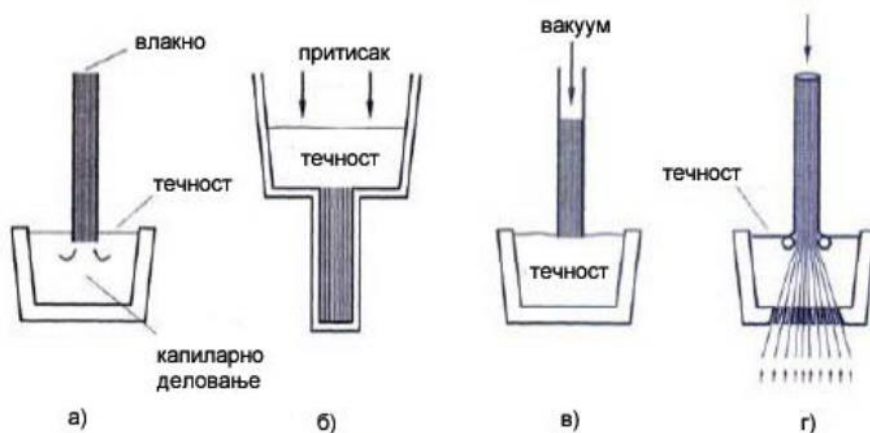
- врло брза и економична метода,
- контрола брзине намотавања,
- може се регулисати удео смоле на влакнима,
- трошкови су мањи због тога што се троше појединачна влакна, а не ткања,
- могу се добити одлична механичка својства композита ако се влакна послажу у смеру деловања оптерећења.

Недостаци:

- облици производа који се добијају су ограничени,
- поређати влакна на различите облике није увек лако,
- трошкови дела на коју се намотава могу бити високи у случају израде великих делова,
- спољашња површина производа није увек естетски прихватљива,
- прилично неодређена спољашња површина делова искључиво конвексног облика.

6.2.2. Ливење

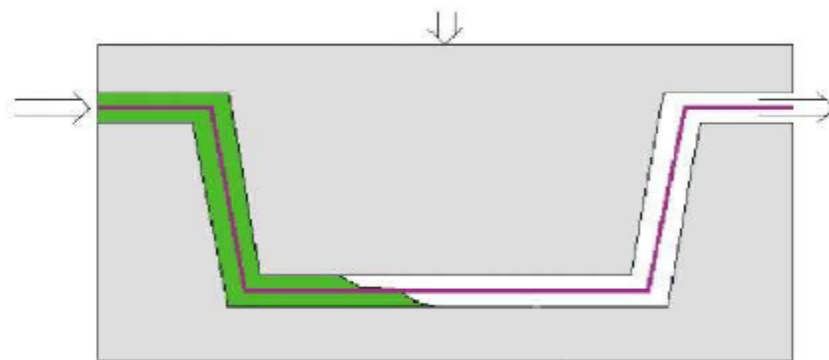
Полимерни композит могу се произвести различитим поступцима ливења. У зависности од начина како се течност полимерне смоле уноси међу влакна разликује се капиларно ливење, ливење под притиском, вакуумско инфилтрирање или континуално ливење (сл. 23).



Слика 23: Производња композита ливењем а) капиларно ливење, б) ливење под притиском, в) вакуумско инфилтрирање, г) континуално ливење [3]

6.2.3. РТМ поступак

На слици 24 приказан је начин ливења под притиском познат као РТМ поступак. Полимерна смола улива се под млазом у калупну шупљину и распоређује око ојачивача, а након полимеризације постакнуте загревањем, калуп се уклапа и добија се производ готовог облика.



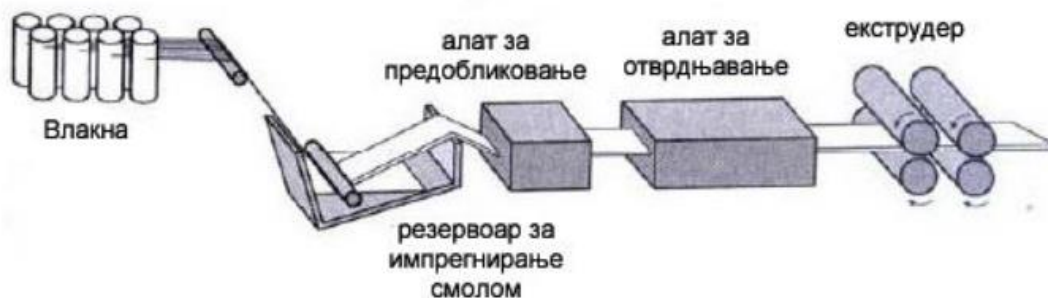
Слика 24: РТМ поступак [3]

На овај начин могу се лити епоксидне, полиестерске, винилестерске и фенолне смоле, а као ојачивачи користе се разна влакна.

Предност РТМ технике су: велики запремински удео ојачивача, ниски садржај ваздуха, добри радни услови као могућност аутоматизације процеса, одличан изглед завршне површине, док су недостаци: веома сложен и велики алат, висока цена алата и ограничење на производе малих димензија.

6.2.4. Пултрудирање

Пултрудирање се примењује за производњу композитних производа константног попречног пресека. Овим поступком, шематски приказаним на слици 25, сноп континуалних влакана предходно импрегниран дуромерном смолом провлачи се кроз алат одговарајућег облика и након тога следи отврдњавање чиме се добија коначан облик. Уређај за извлачење вуче производ кроз алате и тиме одређује брзину процеса.

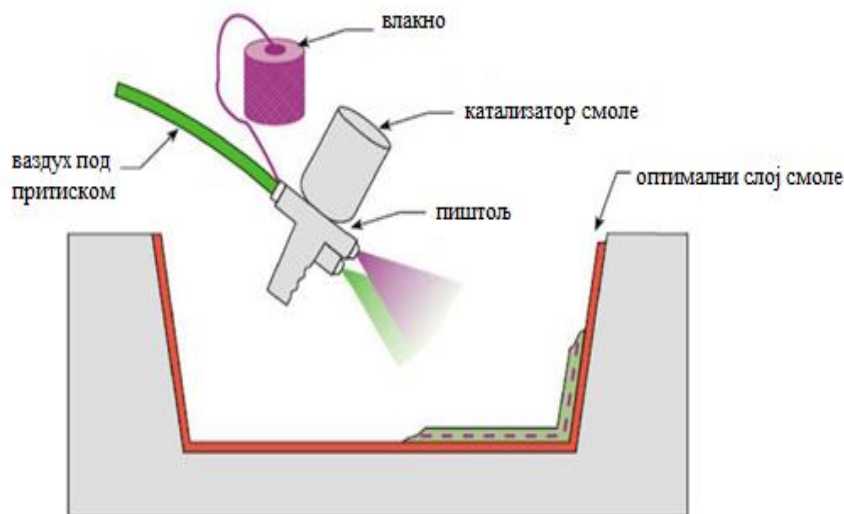


Слика 25: Приказ поступака пултрудирања [3]

Применом одговарајућих алата могу се произвести цеви, шупљи елементи или различити други производи константног облика. Главни ојачивачи су стаклена, угљенична и арамидна влакна уобичајених односа од 40 до 70 запреминских %. Најчешће се као матрице користе полиестерске, винилестерске и епоксидне смоле.

6.2.5. Напрскавање

Влакно улази у ручни пиштољ у којем се сече на мање комадиће и додаје у струју текуће смоле. Таква се мешавина напрскава у калуп где очвршћава у атмосферским условима. Као материјал матрице се углавном користе полиестери, док се за ојачавање користи искључиво стаклени ровинг.



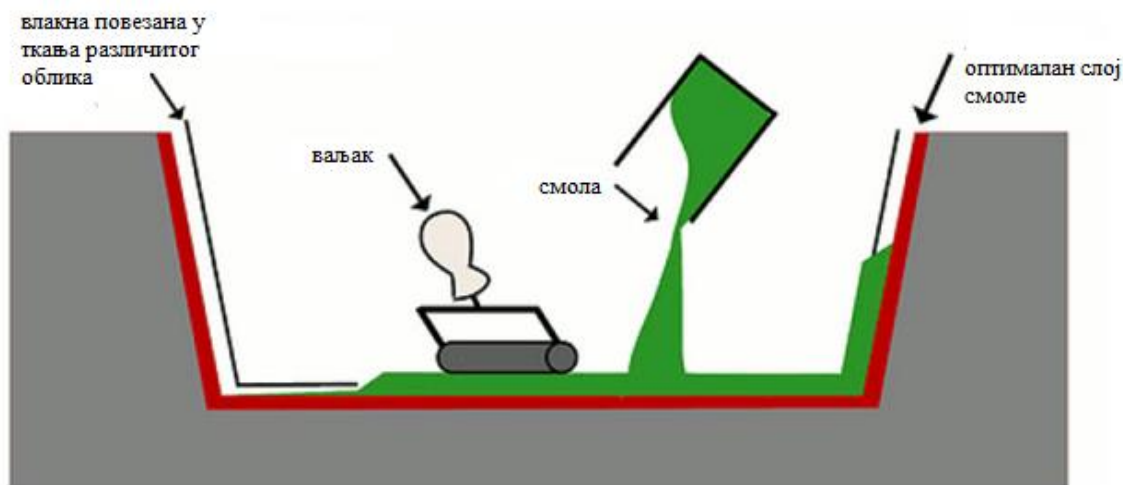
Слика 26: Приказ поступка напрскавања [3]

Недостаци поступка су да производ садржи нешто већу количину смоле тако да имају већу масу. За ојачање се користе само кратка и сечена влакна, тако да коначни производ има ограничена механичка својства. Смола мора имати малу вискозност како би се могле напрскати, а то најчешће иде на штету механичких и топлотних особина. Проблем може представљати и удео стирена који је у неким случајевима и законом ограничен.

Предност је у широкој примени поступка већ низ година, што је то врло јефтин начин таложења влакана и смоле, а и мали је трошак израде алата.

6.2.6. Ручно полагање

Влакна повезана у ткања различитог облика стављају се у калуп. На њих се наноси смола која се импрегнира у ојачања помоћу ваљака (сл. 27). До очвршћавања долази при атмосферским условима. Матрица: сви материјали – полиестери, винил естри, епоксидне смоле, феноли. Сви типови влакана (проблеми се једино могу јавити у случају тежих арамидних влакана које је теже натопити ручно).



Слика 27: Приказ поступка напрскавања [3]

Недостаци:

- квалитет поступака у великој мери зависи од способности радника,
- смоле обично имају мању молекуларну масу, што значи да могу бити штетнији од производа са већом молекуларном масом,
- проблем је уклањање стирена насталог из полиестера и винил естера, морају користити смоле мале вискозности што знатно утиче на својства.

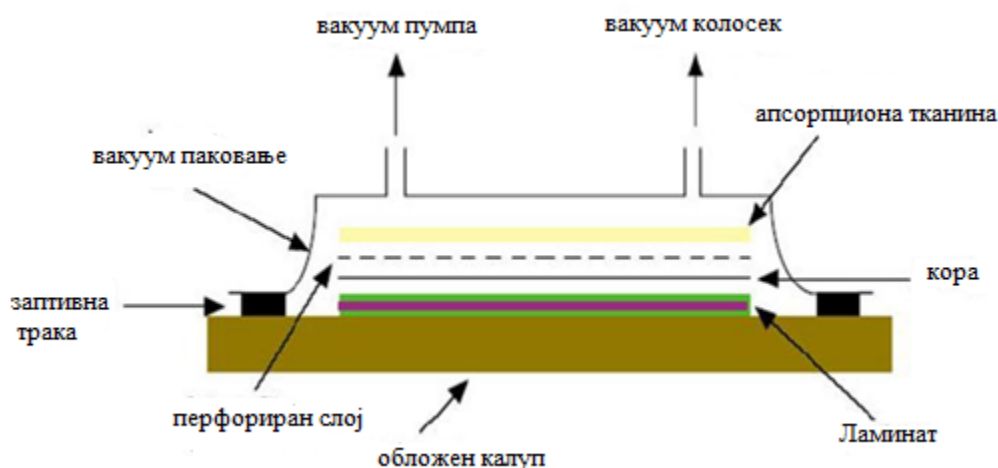
Предности:

- врло једноставан поступак који се примењује већ дуже време,
- мали трошкови израде алата,
- велики избор врста материјала и добављача,
- удео влакана је већи.

6.2.7. Вакуумско спајање

Ручно се сложе све компоненте композита након чега се на њега ставља полимерни покривач. Помоћу вакуумске пумпе се уклања ваздух и подпритисак врши усисавање течне матрице којом се врши спајање елемената композита.

Матрице: фенолне и епоксидне смоле. Проблем може представљати повећана екстракција стирена. Могу се користити све врсте влакана.



Слика 28: Приказ поступака вакуумског спајања [3]

Предности:

- производња композита са већим уделом влакана,
- мање пукотина у материјалу,
- боље је квашење влакана и проток смоле кроз ојачања због деловања повишеног притиска,
- вакуумски покривач смањује количину изветрелих штетних материјала током очвршћавања.

Недостаци:

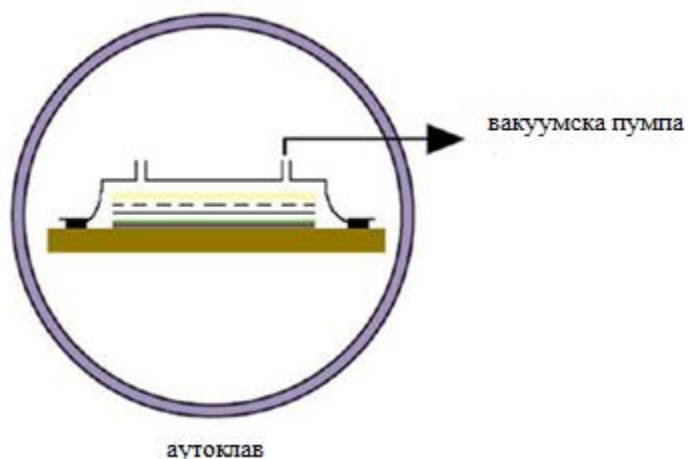
- процес је нешто скупљи и захтева прилично велику вештину оператора.

6.2.8. Препрег

Различита влакна или ткања се предимпрегнирају смолом. Тако добијени облици се најчешће замрзавају како би се могли складиштити дуже време. Смола која се користи није потпуно у чврстом стању тако да је препрег на додир мало лепљив.

Након тога се препрези аутоматски полажу у калуп, вакуумски се пакују и загревавају на 120-180°C. Ако је за постизање бољих својстава композита потребан нешто виши притисак све се то ставља у аутоклав (сл. 29).

Матрице: епоксиде смоле, полиестри, феноли и високотемпературни пластомери као што су полиимиди.



Слика 29: Препрег [3]

Предности:

- могуће је врло прецизно подешавање удела влакана и смоле,
- материјали су потпуно еколошки прихватљиви,
- могуће је импрегнирање и смола високе вискозности чиме се значајно утиче на механичка и топлотна својства композита,
- могућа је аутоматизација целог процеса.

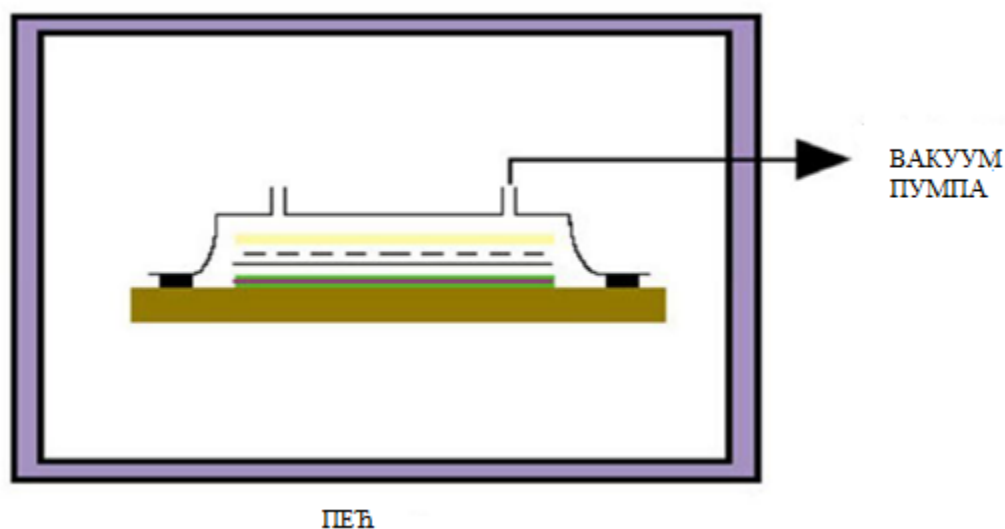
Главни недостаци:

- трошкови материјала су већи,
- материјал се укрути у аутоклавама које су прилично скупе и ограничених су димензија.

Очвршћавање препрега при нижим температурама

Користе се хемијски додаци који омогућају очвршћавање при нешто нижим температурама 60-100 °C. Могућа је примена само вакуумског паковања без аутоклаве (сл. 31).

Матрице су углавном епоксидне смоле, док као ојачање могу послужити све врсте препрега.



Слика 30: Препрег при нижим температурама [3]

Предности:

- могу се користити јефтинији материјали за израду алата, будући да су температуре за крутост нешто ниже,
- због релативне једноставне опреме могућа је израда делова већих димензија,
- мањи трошкови енергије.

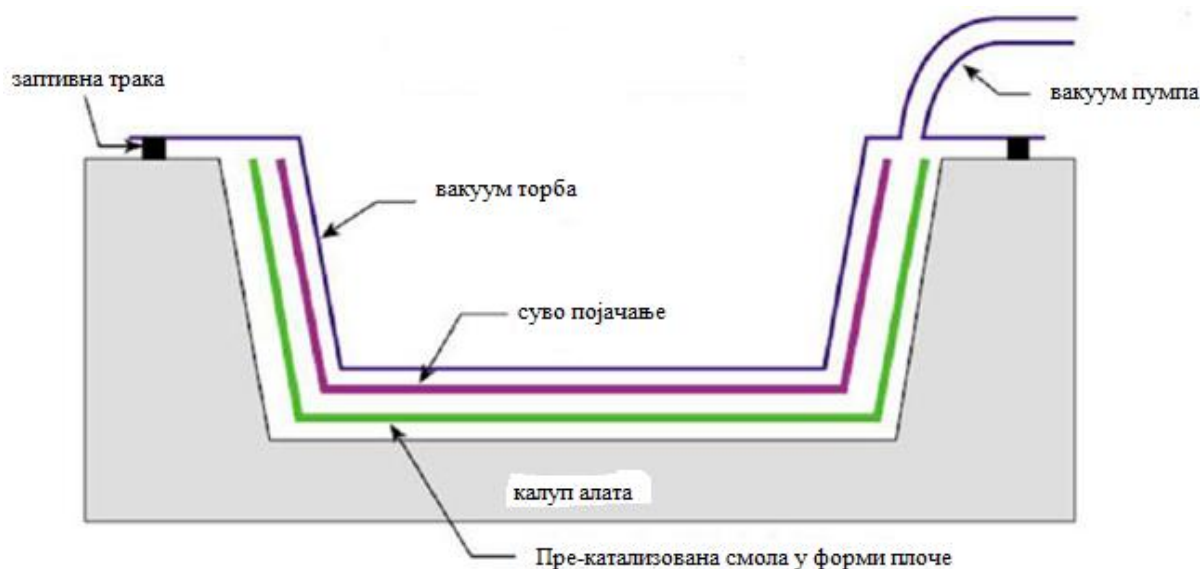
Недостаци:

- већа цена материјала,
- потребна је опрема,
- алат мора издржати температуре 60-100°C.

6.2.9. Инфузија слоја смоле

У калуп се постављају сува ојачања између којих се постављају слојеви смоле која је у полукрутом стању. Смола се налази на специјалном папиру. Помоћу вакуум пумпе се извлачи ваздух након чека следи загревавање чиме се смола доводи у текуће стање и даље испуњава простор између ојачања. Приказ поступка дат је на слици 31.

Користе се све врсте влакнастих ојачања и епоксидних смола.



Слика 31: Приказ поступка инфузије слоја смоле [3]

Предности:

- производња еколошки прихватљивих композита са великим уделом влакана,
- добра механичка својства која се приписују крутом иницијалном стању полимера,
- мањи трошкови него у случају препрегова,
- мања је могућност појаве подручја која нису испуњена смолом.

Недостаци:

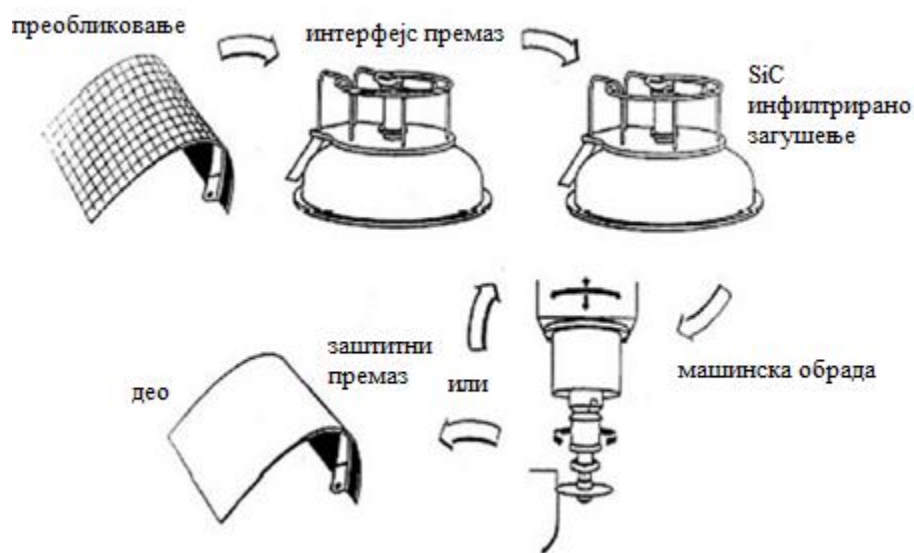
- примењује се једино у авио индустрији,
- потребна је пећ и вакуумско паковање,
- алат мора издржати температуре од 60-100°C.

6.3. Добијање композита са керамичком основом

За добијање композита са керамичком основом користе се поступци:

- ЦВД напаравање,
- усмерена оксидација метала,
- производња SiC/SiC композита импрегнацијом полимера и пиролизом,
- инфилтрација истопљеног материјала.

6.3.1. ЦВД напаравање



Слика 32: Приказ поступака ЦВД напаравања [3]

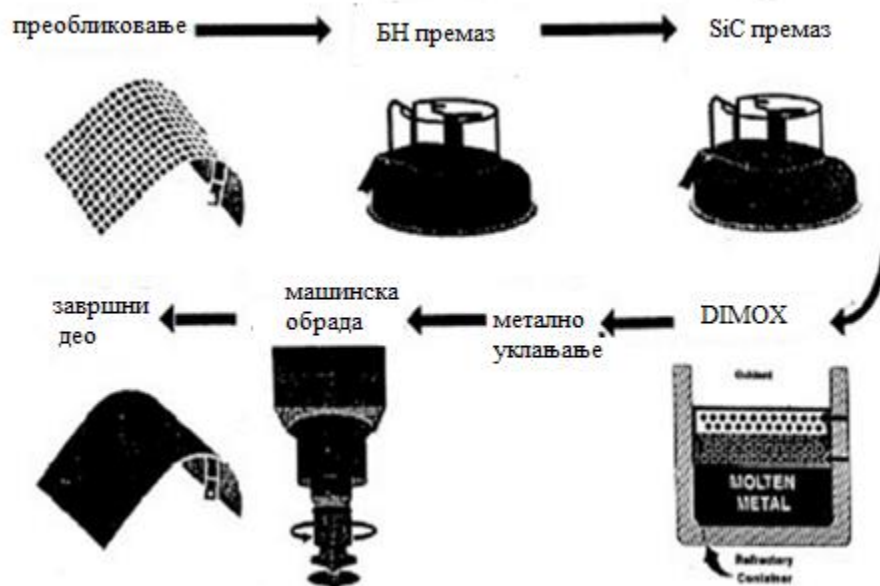
Хемијско напаравање је хемијски процес који се користи за производњу високе чврстоће, високих перформанси чврстог материјала. Процес се често користи у индустрији полупроводника за производњу танких филмова. У типичном, подлога је изложена једном или више испарљивих гасова, који реагују и/или распадају се на површини подлоге.

ЦВД се такође користи за производњу синтетичких дијаманата. Приказ самог поступка дат је на слици 32.

6.3.2. Усмерена оксидација метала

Најпре се ЦВД поступком напаравања наноси превлака на ојачивач.

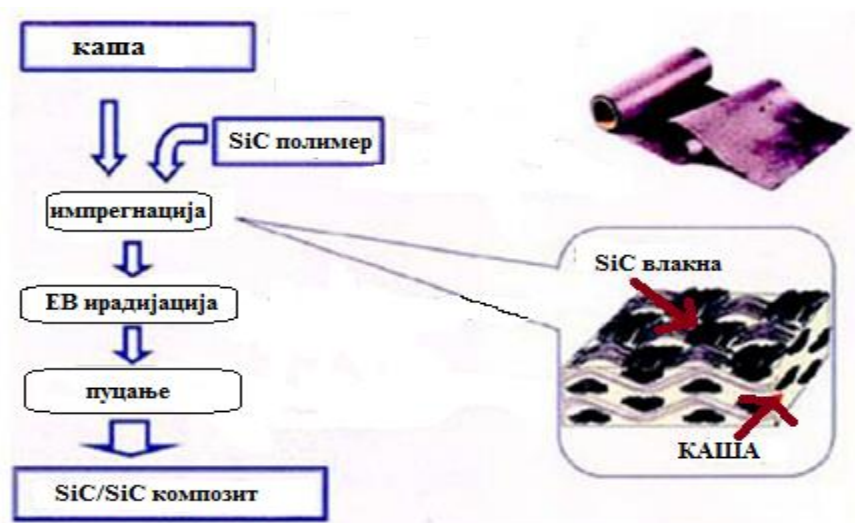
Након тога се ојачивач са превлаком ставља у растопљени метал у реактивној атмосфери кисеоника при чему долази до стварања $\text{Al-Al}_2\text{O}_3$ матрице. Шематски процес приказан је на слици 33.



Слика 33: Приказ поступака усмерене оксидације метала [3]

6.3.3. Производња SiC/SiC композита импрегнацијом полимера и пиролизом

Суспензија од PCS (поликарбосилан) и PVS (поливинилсилан) импергнира се у SiC тканину. Након тога полимерни материјал умрежава под деловањем снопа електрона. Пиролизом долази до трансформације полимера у керамику, као што је дато на слици 34.

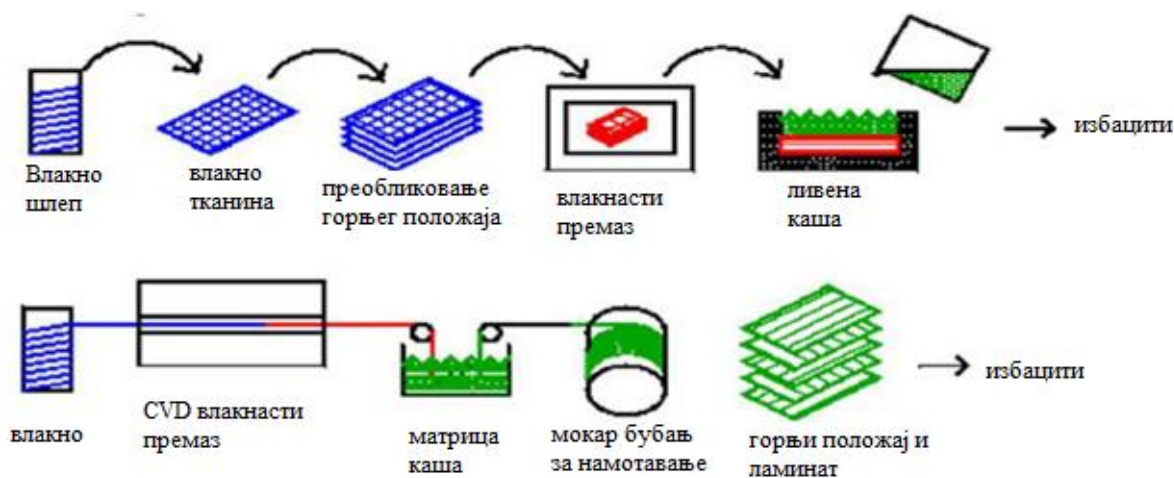


Слика 34: Приказ поступака производње SiC/SiC композита импрегнацијом полимера и пиролизом [3]

6.3.4. Инфилтрација истопљеног материјала

Постоје две варијанте овог поступка.

У првој варијанти прво следи слагање слојева влакана. Након тога се тако сложени слојеви превлаче па се на њих налива суспензија материјала матрице. Завршна фаза је инфилтрација суспензије (сл. 35).



Слика 35: Приказ поступака инфилтрације истопљеног материјала [3]

У другој варијанти најпре се ЦВД поступком наноси превлака на влакна. Затим се влакна урањају у суспензију материјала матрице, након чега следи намотавање, слагање слојева полагањем и инфилтрација.

6.4. Добијање угљеник-угљеник (C-C) композита

Ово је врло компликован и скуп процес. Обично се изводи вишеструким поступком пиролизе материје богате угљеником. Пиролиза је процес термичког разлагања супстанце који се јавља услед дуготрајног излагања високим температурама, али без контакта са кисеоником и осталим оксидационим средствима. Обично услед пиролизе сложена хемијска једињења која улазе у састав пиролизоване супстанце подлежу анализи на простија једињења мање молекулске масе. Механизам хемијских промена који се јављају у току пиролизе је често веома сложен, а због природе тог процеса тешко га је прецизно испитивати.

Разликују се три поступка у зависности од почетног материјала матрице:

- пиролиза чврсте масе,
- пиролиза течне масе,
- пиролиза гасовите масе.

Независно од поступка производње, у зависности од потребних својства конструкционог дела потребно је извршити припрему предоблика угљеничног влакана ојачивача – 1D, 2D, 3D или n-D влакна.

6.4.1. Добијање C-C композита пиролизом чврсте масе

Поступак ове производње се одвија у следећим корацима

- припрема предоблика влакана ојачивача – 1D, 2D, 3D или n-D влакна,
- пиролиза чврсте дуромерне смоле у пећи на температури 1000-1500°C, да испаре из смоле сви елементи осим угљеника – карбонизација, импрегнација угљеничних влакана ојачивача врућом дуромерном смолом под високим притиском, чиме се стварају мала графитна подручја и постиже коначна чврстоћа, али остају многе поре које се испуњавају поновном импрегнацијом врућом смолом,
- вишеструко понављање (од 1-4 пута) – споро и скупо.
- топлотна обрада 1500-2200°C за добијање завршног облика.

6.4.2. Добијање С-С композита пиролизом течне масе

Поступак ове производње се одвија у следећим корацима

- припрема предоблика влакана ојачивача – 1D, 2D, 3D или n-D влакна,
- пиролиза течне пластомерне смоле (катрана) у пећи на температури 550-800°C, са или без притиска,
- импрегнација угљеничних влакана ојачивача чиме се стварају мала графитна подручја и постиже коначна чврстоћа, али остају поре које се испуњавају поновном импрегнацијом,
- карбонизација у пећи на температури 1000-1500°C, да испаре из смоле сви елементи осим угљеника,
- вишеструко понављање (од 1-4 пута) – споро и скупо,
- топлотна обрада 2200-2750°C за добијање завршног облика.

6.4.3. Добијање С-С композита пиролизом гасовите масе

Поступак ове производње се одвија у следећим корацима:

- припрема предоблика влакана ојачивача – 1D, 2D, 3D или n-D влакна,
- пиролиза гасовитог угљоводоника у пећи на температури 800-1200°C, да се издвоје сви елементи осим угљеника – карбонизација,
- импрегнација угљеничних влакана ојачивача чиме се стварају мала графитна подручја и постиже коначна чврстоћа, али остају поре (које се испуњавају поновном импрегнацијом),
- топлотна обрада 2000-2500°C,
- вишеструко понављање (од 1-4 пута) – споро и скупо.

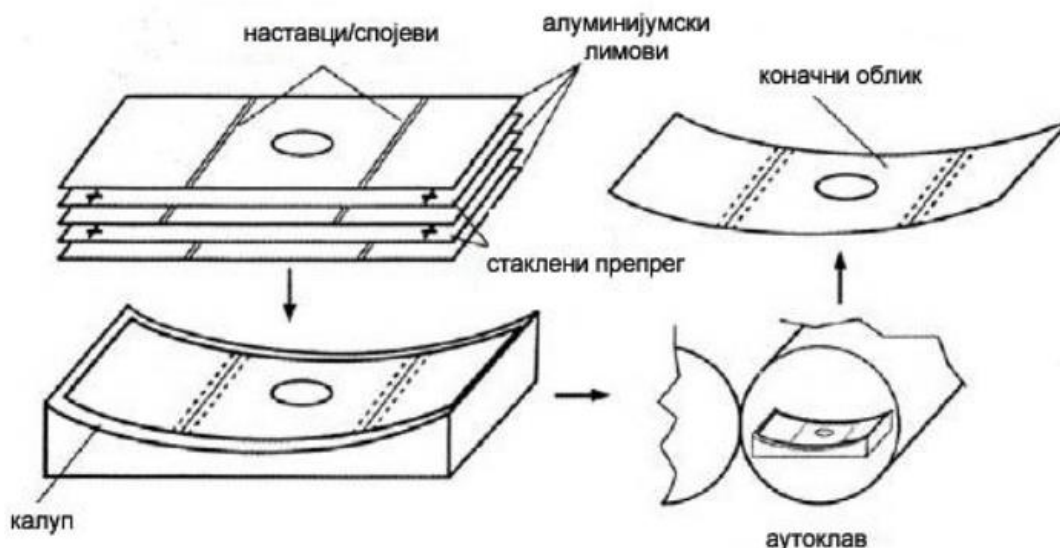
Алтернативни пут: CVD, али врло скупо.

6.5. Слојевити композитни материјали

Слојевити композити или ламинати садрже више слојева ојачања положених у матрицу. Ламинати су, осим у врло специфичним случајевима, још увек анизотропни, али разлика између својстава за различите смерове није толико значајна као код композита са једносмерним влакнима.

На основу овог приступа развијају се ламинати с тако оријентисаним слојевима који осигуравају најбоља својства у смеру деловања оптерећења. Тиме се остварује уштеда на материјалу а према томе и на тежини што је фактор од примарне важности у ваздухопловној индустрији.

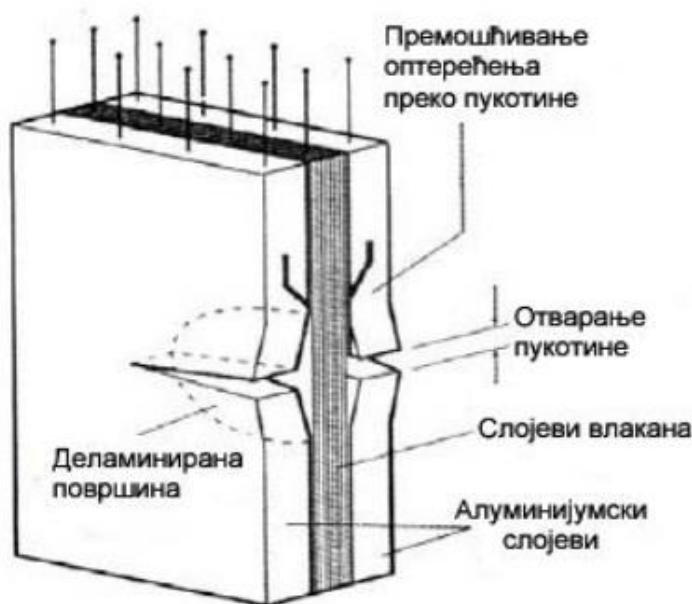
У ваздухопловству се често користе слојевити композити познати као "glare" ламинати. "Glare" ламинати садрже алуминијумске лимове додатно ојачане стакленим влакнима. Полагањем препрека (стаклене тканине натопљене полимерном смолом) између алуминијумских лимова добија се вишеслојна структура која садржи неколико редова ојачања (сл. 36).



Слика 36: Поступак производње "glare" ламината [4]

Након полагања влакана лимови се међусобно спајају и након обликовања у калупу материјал се излаже повишеној температури и притиску како би полимерна смола омекшала и полимеризовала чврсто везујући алуминијумске слојеве. Механичка својства оваквог композита одређена су смером оријентације влакана у појединим слојевима. Зато се код уградње "glare" ламинати морају тако оријентисати да имају највећу механичку отпорност управо у смеру деловања највећих спољашних оптерећења. Вишеслојно ојачане "glare" ламинате у принципу одликује значајно виша чврстоћа у односу на класичне алуминијумске легуре уз задржавање мале масе.

Осим веће механичке отпорности "glare" ламинати показују и побољшану отпорност на пукотине. Ако се у алуминијумским лимовима јави пукотина сноп стаклених влакана успешно премошћава пукотину и на тај начин успорава или спречава њено ширење, као што показује слика 37.



Слика 37: "Glare" ламинат- премошћавање пукотине слојем стаклених влакана [4]

"Glare" ламинати масовно су заступљени у изради Ербасових (Airbus) авиона A380 где се користе за делове оплате тела авиона, за бочне плоче, горње делове крила, и крмене делове тела. Уграђени ламинати садрже четири или више алуминијумских лимова дебљине 0,38 mm између којих се налази везни слој смолом натопљених стаклених влакана. Употребом оваквих ламината остварена је значајна уштеда на тежини авиона, чак до 30% у односу на класичне алуминијумске легуре.

6.6. Сендвич конструкције

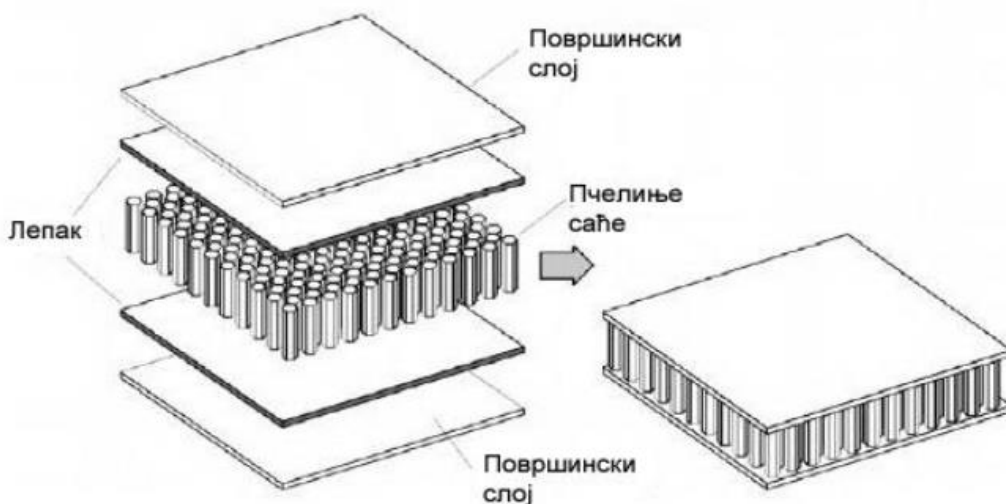
Сендвич конструкције састоје се од два чврста и крута танка спољна слоја између којих се налази лаки материјал који чини језгро (сл.38). Захваљујући малој маси одликује их висока специфична чврстоћа и висока специфична крутост.

Као материјали језгра користе се:

- полимерне пене, од поливинил,
- алуминијум или полимерни композити,
- дрво (балза, кедар).

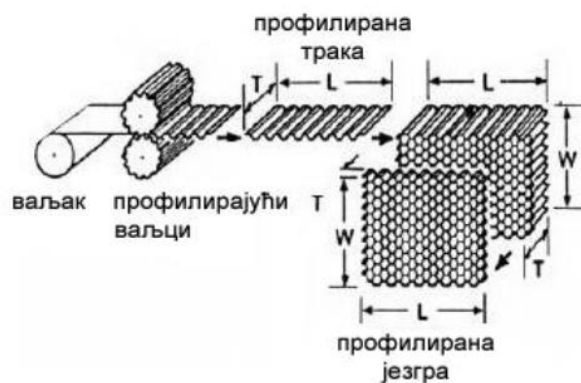
Површински слојеви могу бити, а често и јесу, направљени од материјала веће чврстоће и крутости. За спољне слојеве преферирају се легуре алуминијума, полимерни композити ојачани влакнима, титанове легуре и челик.

У ваздухопловству је нарочито значајна структура сендвич конструкције у облику пчелињег саћа која садржи алуминијумско језгро облика саћа положено између танких спољних слојева, најчешће алуминијумске фолије (лимова) или ламината (сл. 38). Тиме се добија врло постојан, крут, чврст и изузетно лак сендвич који је захваљујући својим предностима широко применљив у изради ваздухопловних конструкција.



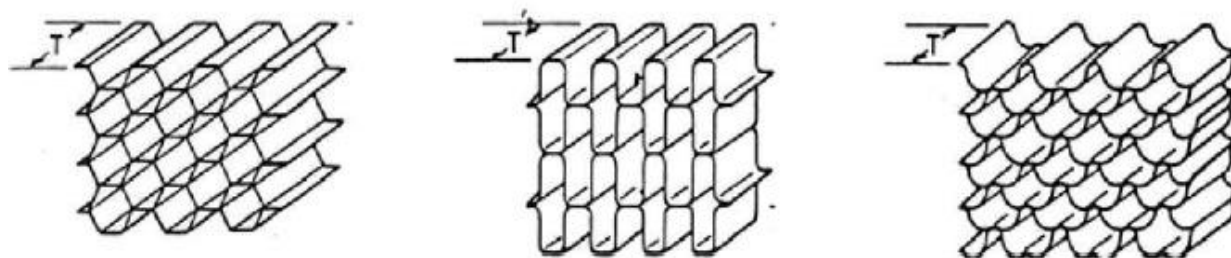
Слика 38: Композити сендвич са језгром у облику пчелињег саћа [4]

Слика 39 приказује начин производње саћастих алуминијумских језгра поступком профилисања.



Слика 39: Производња саћастих алуминијумских језгра профилисања [4]

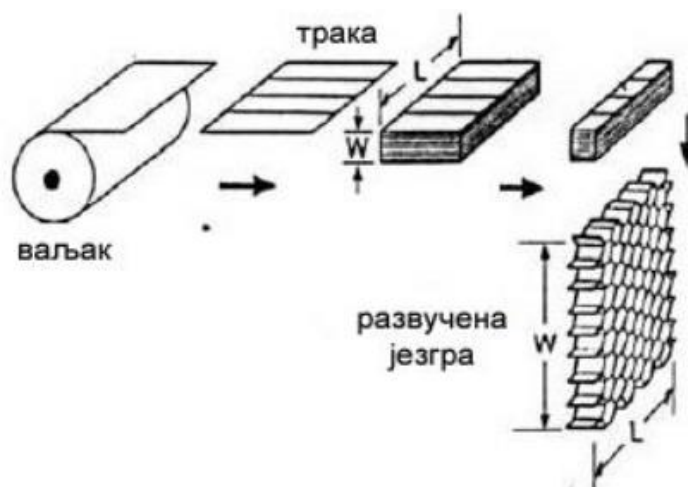
Ваљане алуминијске фолије или лимови обликују се провлачењем кроз профилисане ваљке и тако профилисани међусобно спајају стварајући структуру са шестоугло обликованим ћелијама. Осим хексагоналног облика ћелија могући су и други облици зависно од начина профилисања (сл. 40).



Слика 40: Облици језгра алуминијумског композитног сендвича [4]

Језгро мора бити положено тако да је основна ћелија нормална на област површинских слојева да би се постигла крутост у области нормалној на спољни слој.

Саћаста језгра се могу изградити и лепљењем танких алуминијумских трака на изолованим (појединачним) местима. Тако повезани слојеви затим се развлаче у одређеном смеру чиме настаје ћелијска структура, (слика 41).



Слика 41: Производња саћастих алуминијумских језгра развлачењем [4]

Композитни сендвичи саћастог алуминијумског језгра широко су примењиви код оплате крила, тела и репа авиона односно у изради свих оних конструкцијских елемената који морају бити високе чврстоће и високе крутости а истовремено мале масе. Око 100 таквих алуминијумских сендвич панела коришћено је код Еирбасових авиона А380 у изради избочених делова оплате који спајају тело и крило.

6.7. Поступци производње биокompозита

Због сличних или истих облика ојачивача али и матрица поступци израде биокompозита се поклапају с поступцима израде ПМЦ.

А то су:

- напрскавање,
- ручно полагање (аутоматско ламинирање),
- пултрудирање (40-70 % ојачивача),
- RTM (Resin Transfer Moulding),
- намотавање (Filament Winding),
- препрег.

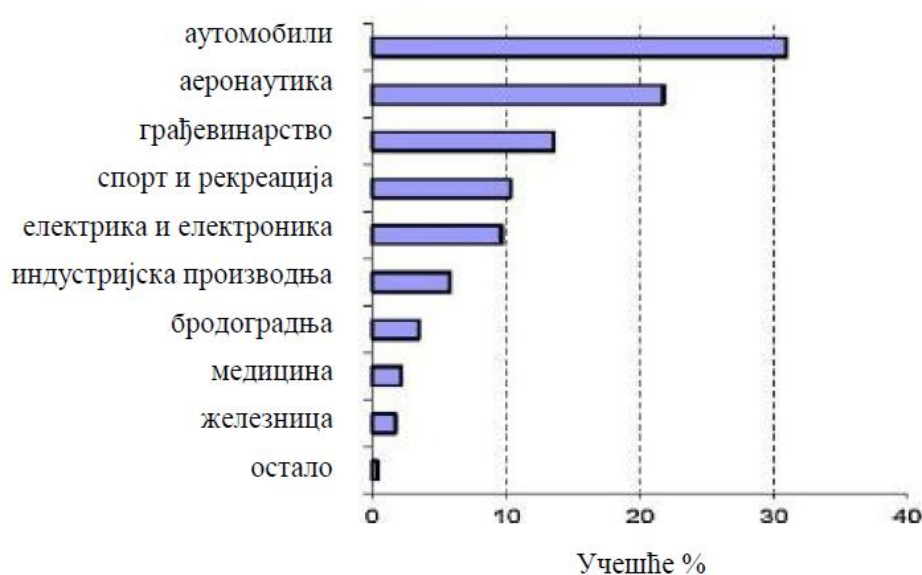
7. Примена композитних материјала

Побољшане својства композитних материјала пружају могућност њихове широке примене. Упоследњим деценијама направљено је мноштво нових са неким изузетно корисним својства. Пажљивим избором материјала ојачивача и матрице и производног процеса којим се они спајају, могу се добити композити са својствима потребним за специјалне примене. Користе се у:

- аутомобилској, камионској,
- авионској (конструкциони делови путничких авиона, једрилице, куполе, усмеривачи ваздуха, крилца, вертикални стабилизатори, кракови елисе хеликоптера, пропелери, вратила трансмисије, дискови кочница ваздухоплова),
- свемирској (стартне ракете, резервоари, млазнице, облоге за улазак у атмосферу) индустрији;
- грађевинарству (бетони, малтери, цигле, блокови, покривачи, облоге, пунила, лепкови, унутрашњи зидови, врата, намештај, каде, туш-кабине, телефонске кабине),
- спорту: спортска опрема (одећа, обућа, подлоге, реквизити: мотке, рекети за тенис и сквош, штапови за пецање, скије, штапови за скок преко мотке, једра, једрилице, даске за једрење, даске за сурфовање, лукови и стреле, атлетска копља, заштитне кациге, оквир бицикла, опрема за голф, опрема за спортско веслање),
- електронској индустрији (електрична изолација делова, изолација од утицаја електромагнетних таласа, подлоге склопки, подлоге штампаних кола, оклопи, кућишта, поклопци, сателитске антене, радарске антене, куполе, врхови ТВ торњева, канали за каблове, ветрењаче),
- општем машинству (зупчаници, лежајеви, заштитни поклопци, кућишта редуктора, дизалице, руке робота, наплатци, летве за ткање, цеви, делови плоче за цртање, боце за компримовани гас, цеви за морске платформе, радијални пнеуматици),
- бродоградњи (бродови лебдилице - хOVERкрафти, бродови за спасавање, патролни бродови, мале рибарице, рибарски бродови, опрема за искрцавање, миноловци, регатне бродове, бродове за забаву, кануи),

- медицине (замене за природне органе: вештачке кости, вештачки залисци срца, дентални елементи и закрпе),
- железничкој (чеони делови локомотива, конструкциони делови, вагони, врата, седишта и унутрашње преграде путничких вагона, кућишта вентилатора, кабине жичара),
- војној индустрији – за израду оружја (рукохвати, кућишта, рамови, нишани, ракетни лансери), средстава заштите (заштитне маске, наочаре, обућа, оклопи, шлемови) и транспорта, итд.

На слици 42 је дат вредносни удео композитних материјала у разним врстама индустрија које их користе.



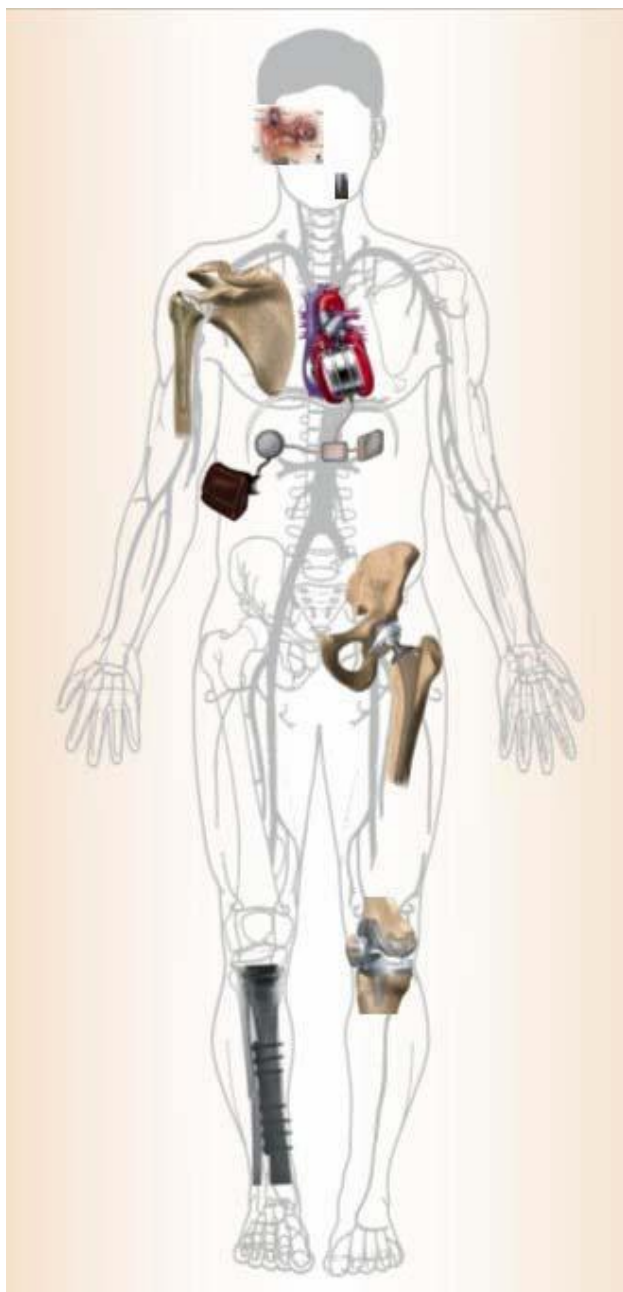
Слика 42: Удео композитних материјала у индустријским производима [5]

Једино ограничење код примене ове врсте материјала је однос ЦЕНА-ПЕРФОРМАНСЕ.

У даљем делу ће бити дат осврт о примени композитних материјала у транспорту: аутомобилској индустрији - због масовности производње и у авиоиндустрији - због напредних материјала и технологија и медицине - јер напредак у медицини гарантује продужење и квалитет живота и у војној индустрији.

7.1. Примена композитних материјала у медицини

Композити метал-керамика, или угљеник-угљеник, су погодни за примену у медицини јер су биокompatibilни, отпорни на корозију, хемијски постојани и добро подносе напрезање на истезање. Они се користе за израду вештачких импланта, попут срчаних зализака, кукова, импланта колена и др. (слика 43).

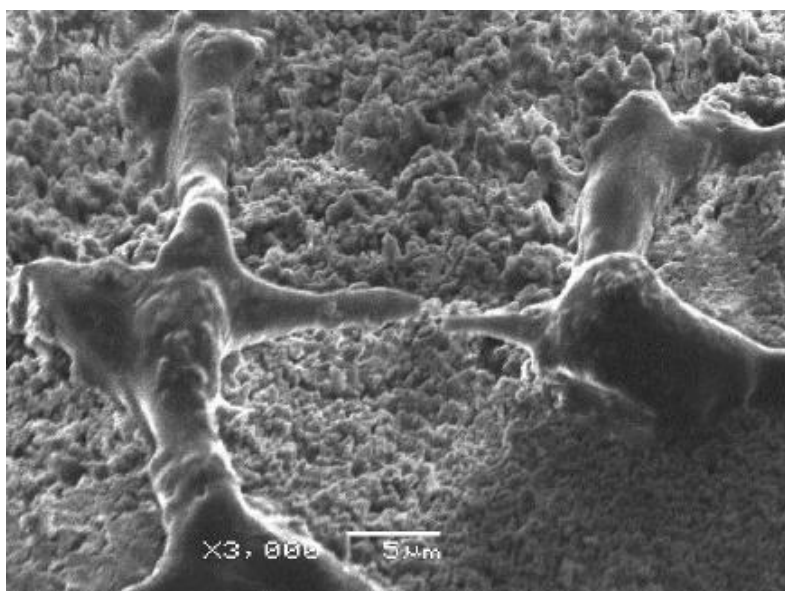


Слика 43: Шта се све данас реконструише уз помоћ композита (биоматеријала) [6]

Срчани залиски се праве од пиролитичког карбона, а кукови од карбон-полимер или карбон-карбон композита. Додатна предност је што при уградњи карбон-карбон кукова није потребна употреба цементног везива. Карбон-полимер композитни материјали служе и за плоче за тзв. остеосинтезу, којима се делови кости причвршћују један за други. Механичка својства композита морају одговарати костима, чиме се спречава деградација костију до које често долази када се користе металне плоче. Осим тога, композитна плоча може трајно да остане у организму, јер после неког времена ткиво обраста око ње.

Коштано ткиво је посебно интересантно поље научних истраживања, како због веома честе појаве остеопорозе тако и због саме градивне природе организма. Природна кост се највећим делом састоји од нанокристала и наночестица калцијум фосфата. Синтеза нанокристаличних и наноструктурних калцијум фосфата и композита за реконструкцију коштаног ткива представља основно поље истраживања многих истраживачких група за нове материјале и процесе.

Са овим материјалом (Проф. др Ненад Игњатовић из ИТН САНУ) и одређеним биокомпатибилним полимерима синтетисан је композитни биоматеријал који се с правом може назвати „ВЕШТАЧКА КОСТ“ (слика 44). Мада је синтетисана вештачким путем, она је не само по хемијском саставу него и по структури готово иста као природна кост, а поседује и иста механичка својства, порозност итд.



Слика 44: Предклиничка истраживања: ћелије фибробласта „уживају“ на биоматеријалу [6]

Концепт овог биоматеријала и импланата који су од њега направљени сасвим је нов и разликује се од свих раније познатих. Наиме, након имплантације овај „паметни материјал“, једноставно речено, „оживи“, прилагођава се потребама организма и његовом метаболизму и на крају нестаје (умире) а на његово место долази новоформирано ткиво. Овај биоматеријал се састоји од бионересорбилне и организму потребне компоненте (хидроксиапатита и трикалцијум фосфата) и биоресорбилне полимерне компоненте. Временом се полимер ресорбује и нестаје а продукти његове разградње – вода и угљендиоксид – апсолутно су нештетни за било који организам. Полимер нестаје истом брзином којом се формира ново ткиво организма, тако да на крају процеса репарације место полимера заузима ново ткиво које је сам организам створио. Из тих разлога, пролиферација ткива кроз имплант је потпуна.

Савремена стоматологија познаје многе материјале којима решава комплексне проблеме, попут надокнаде пропалих зубних структура, надокнаде целог зуба или зубног низа. У те сврхе употребљавају се фиксна протетичка надоградња, подржаване природним зубима или имплантатима. Најчешће кориштени материјали су метали, керамика и акрилатни полимери. Ови материјали не задовољавају низ параметара у механичком, физичком, хемијском те биолошком аспекту. Из тих разлога стално се истражују нови материјали, уз побољшања својстава постојећих.

Композитни материјали примену су нашли и у рестауративној стоматологији. То је грана стоматологије која се бави сложеним интервенцијама на оболелој или трауматски оштећеној пулпи зуба (најчешће је реч о каријесу), слика 45. Лаички, рестауративна стоматологија бави се надоградњом зуба ради обнављања функције жвакања или у естетске сврхе.



Слика 45: Изглед поправљеног зуба извешен композитним материјалом (лево) у односу на класични материјал пломбе (десно) [6]

Први материјали који су се употребљавали у рестауративној стоматологији били су дентални амалгами, а данас су то композитни материјали. Композитни материјали који се користе у рестауративној стоматологији припадају скупу материјала с полимерском матрицом, а као пунило се користе анорганске честице. Композити који се користе морају задовољавати многа својства која не зависе само од састава и међусобног односа појединих састојака у композитном материјалу него и о односу тога материјала према променљивим условима у усној шупљини. Температура у усној шупљини осцилује између 32 и 37°C, зависно од спољне температуре и отварања уста. Међутим, уношењем различите хране и пића температура може достићи и распон од 0 до 70°C. Вриједност рХ (рН) пљувачке при томе варира од 4 до 8,5. Кисела пића или неки лекови могу тај рХ знатно променити, па су тако забележене вриједности пХ пљувачке у распону од 2 до 11. Жваћно притисно напрезање на површини зуба или рестауративног материјала може бити незнатно, али и достићи величину од 50 N/mm².

Првобитне поделе денталних композитних материјала заснивале су се на величини честица пуниоца, односно хемијском саставу композита. Данас су материјали битно побољшани смањењем величине честица и побољшањем квалитета пуниоца, побољшањем адхезије између пуниоца и органске матрице, а увођењем полимера ниске молекулне масе побољшана је полимеризација и олакшано руковање материјалом. Због тога је данас прихваћена подела на:

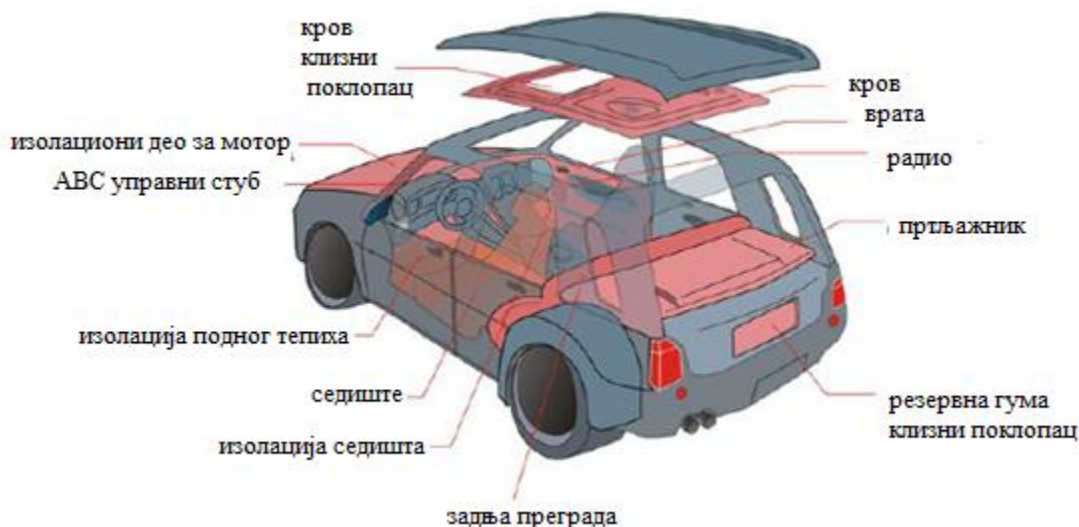
- традиционалне композитне материјале (макропуњени) – са 70–80% пуниоца, величине честица 20–50 μm , а њихов је недостатак храпавост, односно обезбојење,
- микропуњене композитне материјале – са 35–50% пуниоца, величине честица 0,02–0,04 μm , карактерише их висока полираност и естетски изглед и мало лошија физичка својства због мањег удела пуниоца,
- хибридне композитне материјале – са 70–77% пуниоца, величине честица 0,04–5 μm , а својства су им између традиционалних и микропуњених композита.

Композитни материјали данас су потпуно заменили денталне амалгаме, због естетике, ниске топлотне проводности, механичке адхезије за тврдо зубно ткиво, зато што не садрже живу, могу ојачати тврдо зубно ткиво па се њима лакше рукује. Композити имају и неке недостатке, као што је дуге време припреме, стезање приликом полимеризације, што може узроковати напрезање, самим тим, мало краће време употребе.

Због тога се интензивно истражују нови композитни материјали који ће уклонити наведене недостатке.

7.2. Примена композитних материјала у аутоиндустрији

Аутомобилска индустрија, као једна од најзначајнијих великосеријских производних система, све више се ослања на композитне материјале – чак и на местима које су „до јуче“ била резервисана за примену високолегираних и издржљивих металних материјала (најчешће челика). Просечан аутомобил има уобичајено велики број изузетно одговорних делова: делове електроинсталације, разне клизне лежајеве, тарне (фрикционе) плоче на кочницам и мање одговорних делова: унутрашње облоге, пресвлаке седишта, начињених од композитних материјала (слика 46).



Слика 46: Делови путничког аутомобила начињени од композитног материјала [7]

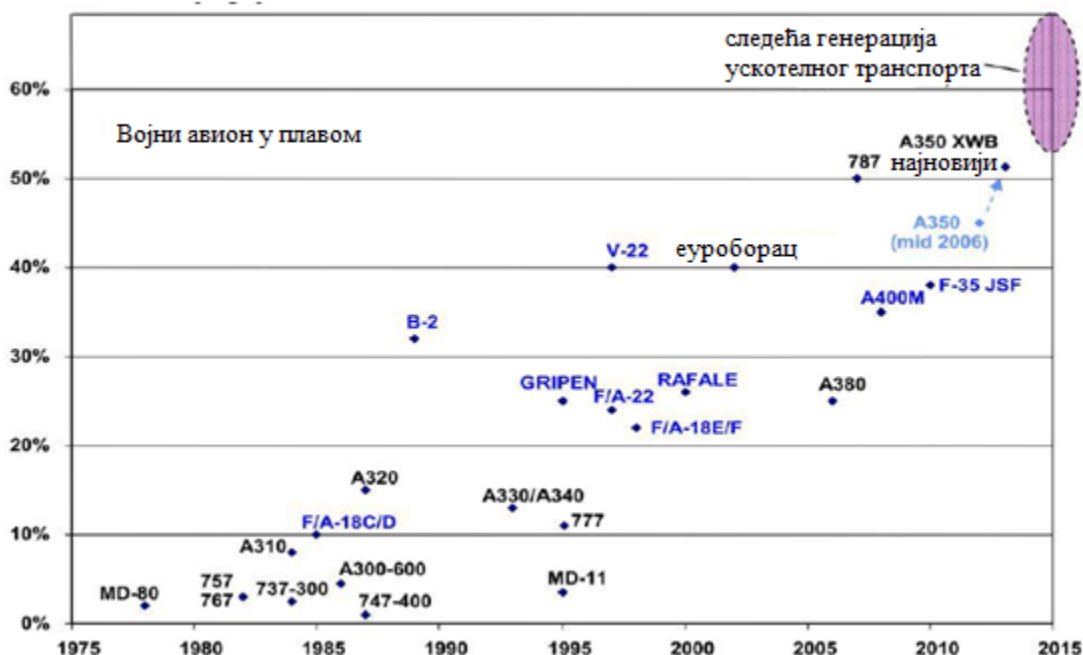
Треба истаћи да се од композита граде: делови каросерије, комплетне каросерије, кочионе облоге, кочиони дискови, делови мотора (блок, клипњаче), волани, браници, решетке хладњака, вратила трансмисије, опруге огибљења, резервоари за плин, шасије, зглобови огибљења, навлаке, кабине, седишта, аутоцистерне, хладњаче, приколице.

7.3. Примена композитних материјала у авиоиндустрији

Њихова примена у ваздухопловству првенствено је условљена ниском густином, високом чврстоћом и крутошћу с обзиром на густину као и одличним физичким својствима.

Употребом композитних материјала у изради авионских конструкција значајно се може смањити тежина авиона и тиме остварити мања потрошња горива или је могуће повећати корисну носивост на рачун мање тежине што опет повољно утиче на смањење трошкова.

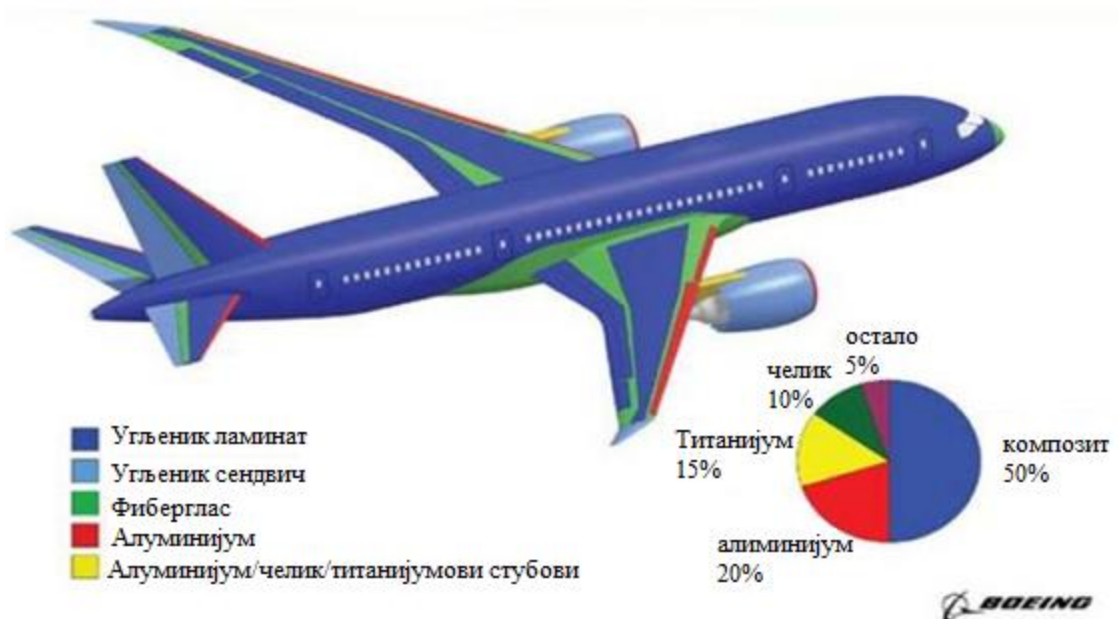
Следећа предност композита је њихова могућност обликовања у веома сложене облике чиме се смањује не само број позиција неког склопа, већ и потреба за причвршћивањем и спајањем. Предности су двоструке: уз мањи број позиција скраћује се време потребно за монтажу, али се смањује и број потенцијално опасних места иницирања прслине будући да елементи као што су завртњи и различите матице делују као сакупљачи напрезања. У односу на конвенционалне конструкцијске материјале композити су мање осетљиви на појаву различитих облика оштећења што доприноси њиховој трајности.



Слика 47:Процентни удео композитних материјала у савременим путничким авионима[8]

И напослетку треба истаћи да су то материјали који се могу дизајнирати (пројектовати) у циљу постизања управо онаквих својстава каква се траже код одређене примене, а која нису остварљива код материјала компонената. Због свега тога композити представљају успешну алтернативу конвенционалним металним материјалима у изради конструкцијских елемената као што су оплата крила и тела као и бројних других елемената авиона. Развој модерних авиона великим делом је условљен применом управо композитних материјала чији удео непрекидно расте (слика 47).

Спољашњи делови авиона се праве од арамид-алуминијум композита који поседује необичну комбинацију јачине, крутости, отпорности на корозију и мале тежине. Уз то је побољшана и отпорност на замор. За израду компоненти авионских мотора користе се композити са металном матрицом (слика 48).



Слика 48: Учешће композитних материјала код савремених путничких авиона [8]

7.4. Примена композитних материјала у војнојиндустрији

Од 1950. године појављују се течни полимери који у таквом стању могу да приме знатно више чврстих компонената, а да задрже способност ливења. Очвршћавање долази након неког времена и његова брзина се може регулисати. На овакав начин се могу излити пуњења великих димензија, што је велика предност у односу на хомогена горива. Период развоја ракетних горива од 1950. године може се поделити у два дела:

- први период од 1950. до 1965. године када су композитна горива произвођена са везивом на бази *полисулфида* и *полиуретана*,
- други период од 1965. године до данас када се као везива углавном користе *полибутадијени са функционалним групама*, затим *кополимери бутадијена и акрилна киселина*.

Ова нова врста полимера даје еластомерна везива са знатно бољим перформансама: примају више оксиданаса и могу се користити на веома ниским температурама. Значајан тренутак у историји композитних ракетних горива јесте и почетак употребе амонијум-перхлората, као оксиданаса, уместо дуго времена коришћеног амонијум-нитрата.



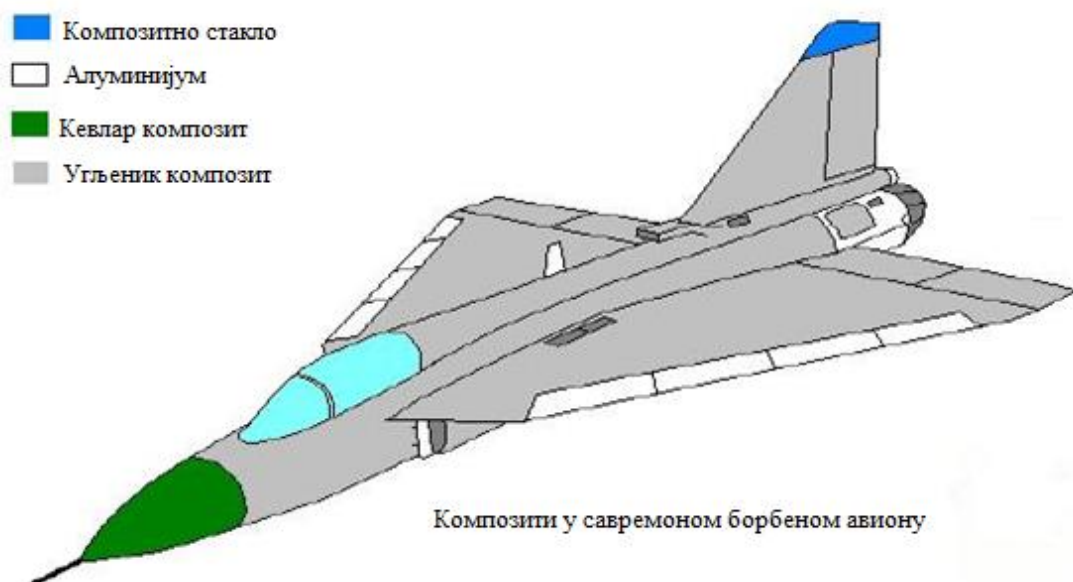
Слика 49: Изглед композитног барута [9]

Од композитних барута тражи се да има:

- Висока енергетска својства, дефинисана специфичним импулсом (однос потиска ракетног мотора са потрошњом барута у јединици времена). Како повећање специфичног импулса захтева повећање садржаја оксиданса у барутном саставу, том повећању треба приступити веома обазриво, јер састави са високим садржајем оксиданса су и веома снажни експлозивни,
- повећану густину која обезбеђује повећану тежину пуњења ракетног мотора,
- механичка својства која омогућују да барутни блок може издржати напрезање којима је изложен за време складиштења и у експлоатацији:
 - да буде отпоран на извијање под сопственом тежином у вертикалном положају,
 - да је отпоран на температурске промене,
 - да издржи притисак припале, који је увек виши од нормалног притиска при раду мотора.

Можемо закључити да за разлику од хомогених колоидних барута у којима активне компоненте (нитроцелулоза и нитроглицерин) имају и оксидативне и редуктивне карактеристике, код композитних барута оксиданти и редуктанти су међусобно физички одвојени и повезани у чврст блок неким везивом. Као оксиданси користе се, најчешће, минералне соли богате кисеоником (хлорати, перхлорати нитрати итд.), а као редуктанти метали (алуминијум, магнезијум, берелијум, литијум, цирконијум). Везиво је истовремено, и носилац угљеника.

Композитни материјали су доказали своју употребљивост у високим технологијама употребљеним при конструисању и изради борбених авиона као што су: F-117, F-18, V22, F35 Stealth Fighters, као и B-2 Bomber (слика 50).



Слика 50: Учешће композитних материјала код савремених борбених авиона [9]

8. Рециклажа композитних материјала

Зашто рециклирати? Зато што рециклирање чува сировине, енергију, штити животну средину и смањује гомилање отпада на депонијама и ван њих.

Овде треба издвојити неке од материјала који се користе за производњу влакана и матрица композита. Сагледано је које су разлике у квалитету материјала из примарне производње и рециклираног материјала. За комерцијалну употребу погодна су стаклена, карбонска, армидна и полиестер влакна док остала можемо сврстати у погодна за употребу у специјалним случајевима. Већа потрошња може оправдати финансије и организацију која мора бити уложена па ће из ових разлога фокус бити на наведеним комерцијалним материјалима, анализу података о овим материјалима и њихових својства везаних за процес рециклаже.

Стакло има добар удео у количини укупног отпада који се генерише те је рециклирање овог ресурса значајно како би се смањило загађење и таложење отпада. Стакло из отпада се може поново употребљавати и погодно је за даљу производњу. Од њега се може правити читава палета производа, преко чаша, флаша, и сличних предмета за кућну употребу па до стаклених влакана за употребу у индустрији и грађевини.

До сада су већ развијени начини прикупљања стаклених отпадака по већ поменутом систему селекције како од стране оних који се баве прикупљањем тако и од стране оних који отпад одлажу. У овако организованом процесу прикупљања може се приступити и раздвајању по одређеним карактеристикама стаклених отпадака као што хемијски састав, боја, могућност даље прераде и слично.



Слика 51: Процес рециклаже стаклене амбалаже [10]

Предности рециклаже стакла како се наводи у организацији WWF (WORLD'S WILD LIFE) огледа се у:

- уштеди енергије а у односу на производњу стакла из сировина. Ломљено (рециклирано) стакло се топи на мањим температурама па се тиме смањује количина употребљене енергије,
- смањењу загађења ваздуха у току процеса за 20% и повезаног загађења воде за 50%,
- смањењу отпада које се одлаже и таложи на депонијама.

Осим што се може рециклирати са 100% искоришћености прикупљеног материјала и што не деградира у процесу коришћења и рециклаже ГПИ предочава следеће предности везане за рециклажу стакла :

- рециклирано стакло може заменити до 95% сировине које се користе у процесу производње. Корист произвођеча се огледа у: Смањењу емисије штетних супстанци и количини употребљених сировина, продужењу века трајања опреме за производњу (нпр. пећи за топљење) и уштеди енергије,
- рециклирано стакло увек има удео у састојцима који се користе при производњи. Што је већи удео то је мања потрошња енергије за топљење у пећима. Ово чини рециклирање стакла исплативо на дуге стазе, смањује цену производње и повољно утиче на очување животне средине,
- више од тоне сировина (1,2 тоне) се сачува употребом 1 тоне рециклираног стакла,
- за сваких 10% рециклираног стакла употребљеног у производњи потрошња енергије се смањи за 2-3%.

Карбон који се најчешће добија из нафте и гаса има одличне карактеристике у погледу еластичности и чврстоће. Може се добијати рециклажом на више различитих начина.

Рециклажа композита којима је истекао рок употребе, најчешће због својстава матрице или због разних механичких оштећења, а у које су уграђена карбонска влакна, своди се на резање ових композита на ситније делове и термичку обраду ради уклањања материјала који чини матрицу. На овај начин производе се кратка влакна за која је потребно развијати начине примене и производње када је у питању употреба у композитима са усмереним влакнима.

Рециклажа искоришћених хемијских деривата нафте и рециклажа отпада органске индустрије типа агро или шумарцке индустрије може послужити да се произведу континуална карбонска влакна од рециклираног карбона из наведених извора. Што се може посматрати кроз неке од примера истраживања, употребе и начина рециклаже.

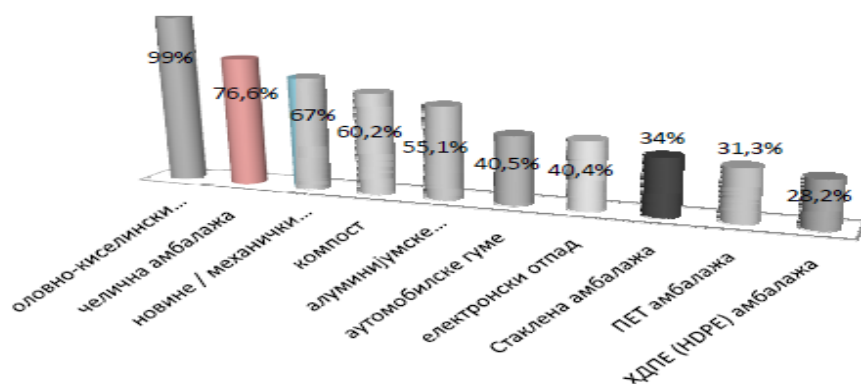
Армид је материјал који се најчешће користи у производњи прслука за заштиту од оружаних пројектила, заштитне опреме као што су рукавице и слично, такође, има примену при производњи оптичких и других каблова, итд. Овај материјал може се посматрати по питању рециклаже слично као и карбон.

Најчешће се прикупљен одбачен материјал сече на ситније делове и тако расподела у кратка влакна. Наравно и рециклажа овог материјала смањује емисију штетних гасова, мање загађења воде која се употребљава у процесу производње и слично.

Смањење емисије угљен диоксида иде и до 50% у односу на примарну производњу.

Разлика између ПЕТ-а из примарне **производње** и рециклираног ПЕТ-а употребљеног у производњи различитих елемената визуелно је неприметна. Ову разлику је могуће детектовати тек на испитивањима и то са малим одступањима због учешћа малог процента нечистоћа и поновног подвргавања термичкој обради материјала. Одступања се још јављају услед деградације материјала услед деловања сунчевих зрака и температуре.

Насупрот овим одступањима уштеда и утицај на очување животне средине су огромни. Рециклирањем ПЕТ-а постиже се уштеда енергије до 70% у односу на производњу нове сировине. Бенефит рециклирања се не огледа само у уштеди енергије и избегавању негативног утицаја који производња те потребне енергије има на животну средину већ и у враћању ПЕТ отпада који би завршио као загађивач у процес производње, а тиме и одстрањивање тог отпада из природног окружења. Оваква употреба рециклираног ПЕТ материјала захтева и око 70% мање емисије сумпор диоксида и скоро 90% мање употребе воде у процесу. На слици 52. дат је приказ количине рециклираних сировина у 2013. години.



Слика 52: Процентуална количина рециклираних сировина у 2013 [11]

Влакна после и током рециклаже приказана су на слици 53.

Добре стране материјала из рециклаже подразумевају поновну употребу материјала који је завршио свој експлоатациони циклус и треба да се одложи или уништи, смањивање трошкова како одлагања тако и производње нових количина производњу, смањење штетних утицаја на животну средину у виду емисије гасова који узрокују ефекат стаклене баште енергената, расипање отпада по природним стаништима и угрожавање природног окружења.

Као негативне стране можемо поменути смањење конструкционих карактеристика и то јесте један од предмета даљих истраживања.



Слика 53: Изглед влакна током и после рециклаже [10]

Позитивне стране се могу констатовати у поређењу са стандардним материјалима као што су нпр. челици за армирање бетонских конструкција јер и са овако незнатно редукованим својства задржавају карактеристике које им дају предност.

Предности су висока затезна чврстоћа, отпорност на корозију, неосетљивост на магнетно поље, висока отпорност на замор (зависи од врсте влакана и може бити и предност и недостатак), мала специфична тежина и својства да су великом већином изолатори (електро и топлотни).

На пример неки од наведених композита имају и много боље модуле еластичности који у односу на челик чији је модул 200 GPa , иду и до 400 GPa што је случај код рециклираног карбона.

Недостаци су што не постоји пластична деформација тј. материјали доживљавају крти лом, мала чврстоћа на смицање, мали модул еластичности (зависи од влакана па тако када су у питању карбонска влакна ово не може бити дефинисано као мана). Осетљивост матрице на ултраљубичасто зрачење (ово важи за већину полимер матрица), лоша отпорност неких композита са стакленим влакнима и армидним влакнима на алкане средине (ово зависи и од матрице у којој се влакна налазе), висок коефицијент температурског ширења управно на правац влакана, осетљивост на пожар (високе температуре) и по том питању зависи од врсте матрице и заштитног слоја бетона.

9. Закључак

Класични материјали претежно поседују добра хемијска и физичка својства (механичка, триболошка, електрична). Међутим, најчешћи је случај да поседују и неко одступање у потребним својствима које значајно ограничава област примене материјала (нпр. непостојаност на високим/ниским температурама, у агресивној средини, корозиона отпорност). Истраживање нових материјала је увело у употребу композитне материјале као материјале који имају најмање „непожељних“ својства.

Истраживања у области композитних материјала имају за циљ да побољшају структурне, термичке, хемијске или неке друге карактеристике појединачних материјала или да се изради предмет који има оптималан однос производна цена-захтеване карактеристике, чиме би се значајно снизила цена готовог производа.

Само у последњих 50-так година у употребу је ушло више нових материјала него у свим претходним вековима. Истраживањем су добивени нови материјали чије карактеристике нису публиковане те се (сада) среће случај да инжењери и технолози не познају добро карактеристике нових материјала па изостаје њихова примена у складу са њиховим могућностима.

У овом раду је дат преглед историјског развоја индустријских композитних материјала, најзначајнијих тренутака од тридесетих година прошлог века до данас. Из истог се види да је главни окидач био ратни напор да се произведе боље и јефтиније борбено средство, а да су се последице тога (по завршетку рата, у мирнодопској производњи) осетиле у производњи квалитетне и јефтине „робе широке потрошње“.

Такође је дат увид у поделе композитних материјала. Поделе се могу извести на онолико начина на колико је могуће посматрати жељена својства композита. Овде су приказане основне поделе при чему су посматрани само ојачивачи или само матрице. Даљим укрштањем ових подела може се добити нови велики скуп детаљнијих подела и на основу ојачивача и матрице.

Наравно, приказани су и општи поступци добијања композитних материјала, разврстани на основу начина извођења. Уопштено гледано поступци су груписани према агрегатном стању материјала основе/ојачивача: чврсто, полутечно, течено и гасовито. Тиме је приказан и технолошки пут употребе композита у зависности од жељених својства.

Конструкциона употреба композитних материјала је врло разноврсна и широка. Данас се не може наћи област људског живота у којој композитни материјали немају свога „представника“. Савремена аутоиндустрија, авиоиндустрија, грађевина, медицина, би стале ако бисмо изузели делове начињене од композита.

Један од најбрже растућих сегмената индустрије композита је подручје копненог транспорта, при чему највећи део отпада на аутомобилску индустрију. Иако се може очекивати да ће индустрија композита расти, брзина раста ће зависити од неколико чинилаца. Најважнији је технички напредак који ће омогућити производњу високих серија убрзањем процеса производње. Остали се односе на конкурентност цене материјала, својства и трајност композита у широком спектру употребе.

Интензивно се ради на замени постојећих материјала композитима с биљним влакнима. Осим што су јефтине и лагана, поправка им је лако изводива. Угљенична влакна су још увијек намењена само за скупе примене. Но како ће потрошња расти, а производња постајати доступнија и јефтинија, цена ће падати. Због тога није нереално очекивати скору појаву елемената каросерије од угљеничних влакана код обичних аутомобила.

Европска унија, тражила да земље чланице до 2015. године искористе и рециклирају 95% отпадних возила. Већ је почела производња спољних делова која води према будућим конструкцијама ултралаких аутомобила и коначној визији „аутомобила који расте на дрвећу“.

Данас се врши све већи притисак на произвођаче материјала и крајњих производа да воде рачуна о последицама њихових производа на околину и то од почетка процеса производње, циклуса примене и крајњег искоришћења производа. Овакав „еко дизајн“ је постао филозофија која се све интензивније примењује за све већи број материјала и еко-производа. Ови захтеви, у комбинацији са неопходним производним трошковима, однедавно су изазвали значајан интерес за добијање еко композитних материјала тако да је фокус академског света као и многих индустрија све више је усмерен према композитима ојачаним природним влакнима, каква су на пример влакна конопље.

Будућност композитних материјала се креће према наноматеријалима. Нова истраживања композита се не односе само на изналажење нових основа и ојачивача, примену и комбиновање до сада истражених чинилаца, већ и на нова молекуларно структурна истраживања матрица, микрочестица и микровлакна ојачивача и њихово заједничко деловање која ће досадашње и садашње материјале послати у историју.

Други од праваца развоја композитних материјала је у области биологије и медицине, у развоју тзв. „биоразградивих материјала“ који ће омогућити поправак, надоградњу и/или замену болесних/оштећених/уништених биолошких органа. Овај правац развоја омогућује човечанству додатно продужење живота, поправљање квалитета живљења и смањење времена које се проведе у стању болести.

Трећи правац развоја је у примени „биокомпозита“, односна композита код кога је бар један чинилац (матрица или ојачивач) од обновљивог материјала.

Циљ овог развоја је успорење у коришћењу необновљивих извора материјала (нафте, разних минерала и руда које су, по природи ствари, у одграниченим количинама).

Четврти правац развоја је у примени „зелених композита“, односна композита код кога је бар сви чиниоци (и матрица и ојачивачи) од обновљивих материјала. Циљ овог развоја је престанку коришћења необновљивих извора материјала. Ови „биобасед материјали“ настају од обновљивих пољопривредних и шумарских продуката, укључујући и пољопривредни отпад, траву и природна биљна влакна које се састоје од угљених хидрата, као што су шећери и скроб, лигнина и целулозе, као и биљна уља и протеине.

Оно што је важно истаћи на крају овог рада је да не постоји најбољи материјал већ за одговарајућу намену постоји одговарајући материјал.

Из истог произилази да се истраживање материјала (кроз науку о материјалима и технологију материјала) за одговарајуће намене неће (никад) завршити.

Литература

- [1] <https://repozitorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A102/datastream/PDF/view> 8.4.2017
- [2] http://www.arh.bg.ac.rs/wpcontent/uploads/Doktorati/2016/2016_15_Miodrag_Grbic_disertacija.pdf?pismo=lat 10.4.2017
- [3] <https://dr.nsk.hr/islandora/object/sfsb%3A146/datastream/PDF/view> 10.4.2017
- [4] http://repozitorij.fsb.hr/1318/1/20_05_2011_Danijel_Tomasic_-_Diplomski_rad_-_PDF_-_600_dpi.pdf 21.4.2017
- [5] https://www.google.rs/search?q=Удео+композитних+материјала+у+индустријским+производима&client=opera&hs=L25&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiWif-cusjUAhWmNJoKHZmCCDUQ_AUICygC&biw=1366&bih=658 25.4.2017
- [6] <http://www.itn.sanu.ac.rs/novosti0707.html> 28.4.2017
- [7] <https://www.slideshare.net/zoranmiljakovic/11asmasinski-materijali> 7.5.2017
- [8] <http://documents.tips/documents/kompozitni-materijali-55a0bed2b0919.html> 15.5.2017
- [9] <http://www.neg.co.jp/en/product/ep/ltcc> 23.5.2017
- [10] <http://documents.tips/documents/recikliranje-kompozitnih-materijala-haramina.html> 16.6.2017
- [11] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [12] Ivica Smojver: Mehanika kompozitnih materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [13] dr. sc. Večeslav Bergman, prof. dr. sc. Adnan Čatović, Danijel Fiket, dr. stom.: Vlaknasto ojačani kompoziti i ceromeri u stomatologiji, MEDIX br. 52, Zagreb, 2004.
- [14] Franjo Kovačiček, Irena Žmak: Metalni kompoziti, MATRIB2004, Velja Luka, 2004.
- [15] Милорад Јовановић, Вукић Лазић, Драган Адамовић, Нада Ратковић: Машински материјали, уџбеник, Машински факултет, Крагујевац, 2003.
- [16] D. Hull: An Introduction to Composite Materials, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1992.
- [17] R.M.Jones: Mechanics of composite materials, Taylor & Francis, 1999