



Назив студијског програма: Машинско инжењерство
Ниво студија: Основне академске студије
Модул: Примењена механика и аутоматско управљање
Предмет: Машински материјали
Број индекса: 39/2010

Марко Горан Раденковић

КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Драган Адамовић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да да преглед развоја и употребе композитних материјала. На почетку дати историјски развој композитних материјала. У даљем делу рада описати њихову класификацију и својства, као и методе добијања. На крају дати примере примене композитних материјала и описати перспективе њиховог развоја.

Оквирни садржај рада:

1. Увод
 2. Композитни материјали кроз историју
 3. Врсте и подела композитних материјала
 4. Особине композитних материјала
 5. Добијање композитних материјала
 6. Примена композитних материјала
 7. Закључак
- Литература

Препоручена литература:

- [1.] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [2.] D. Hull: An Introduction to Composite Materials, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1992.
- [3.] Ivica Smojver: Mehanika kompozitnih materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [4.] Brian Harris: Engineering Composite Materials, The Institute of Materials, London, 1999.
- [5.] Tomislav Filetin, Gojko Marić: Postupci proizvodnje kompozita, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2013.
- [6.] Franjo Kovačiček, Irena Žmak: Metalni kompoziti, MATRIB2004, Velja Luka, 2004.

Крагујевац, март 2013.

ментор:

Проф. др Драган Адамовић

Резиме

Овај рад се бави композитним материјалима. Како су композити настали тако што су употребљени класични материјали како би се комбиновале њихове особине, овде је приказан и развој у налажењу нових композитних материјала и неких начина њихове примене. На основу основних подела композита могу се уочити неке заједничке особине 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 неки примери примене композитних материјала у неким областима: ауто индустрији, у производњи авиона као и у медицини. На крају рада је дат приказ могућег даљег развоја, како нових композита тако и њихових нових начина примене.

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

Abstract

This Bachelor thesis is about composite materials. How composite materials are created by using classic materials in order to combine their features, and also is shown development in the finding of new composite materials and some methods of their application. Based on the basic division of composites it is possible to see some common features. In order to make implementation of existing composite materials easier it is given overview of their production processes. For the same reason, some examples of the use of composite materials are given in some areas: auto industry, aviation industry and medical industry. In the end it is presented potential for further development of new composites and their new application methods.

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

САДРЖАЈ

Contents

1. УВОД	6
2. КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ КРОЗ ИСТОРИЈУ	9
2.1. КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ ПРЕ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА.....	9
2.2. КАДА ЈЕ ПОЧЕЛА МОДЕРНА ИНДУСТРИЈА КОМПОЗИТА	9
2.3. ДРУГИ СВЕТСКИ РАТ И РАЗВОЈ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА	10
2.4. РАЗВОЈ ПОСЛЕ ДРУГОГ СВЕТСКОГ РАТА.....	11
2.5. ВАЗДУШНО-КОСМИЧКИ ПРОСТОР	12
2.6. ДО ДАНАС	13
3. ВРСТЕ И ПОДЕЛА КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА	14
3.1. ПОДЕЛЕ КОМПОЗИТА НА ОСНОВУ ОЈАЧИВАЧА	14
3.2. ПОДЕЛЕ КОМПОЗИТА НА ОСНОВУ МАТРИЦЕ.....	20
3.2.1. Метални композити ММЦ	22
3.2.2. Полимерни композити ПМЦ.....	23
3.2.3. Керамички композити ЦМЦ	26
3.3. Биокмполити	27
4. ОСОБИНЕ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА	29
4.1. МЕТАЛНИ КОМПОЗИТИ ММЦ	34
4.2. ПОЛИМЕРНИ КОМПОЗИТИ ПМЦ	35
4.3. КЕРАМИЧКИ КОМПОЗИТИ ЦМЦ	36
4.4. УГЉЕНИК-УГЉЕНИК КОМПОЗИТИ	36
4.5. ХИБРИДНИ КОМПОЗИТИ	37
5. ДОБИЈАЊЕ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА	38
5.1. ДОБИЈАЊЕ КОМПОЗИТА СА МЕТАЛНОМ ОСНОВОМ	38
5.1.1. Поступци у чврстом стању (Solid State Processing).....	38
5.1.2. Високотемпературна синтеза (SPS Self-Propagating Synthesis)	39
5.1.3. Металургија праха (PM Powder Metallurgy)	39
5.1.4. Поступци у течном стању (Liquid Processing).....	39
5.1.5. Ливење у калуп	39
5.1.6. Ливење мешањем (Stir Casting).....	40
5.1.7. Ливење гњечењем (Squeeze Casting)	40
5.1.8. Ливење у получврстом стању (Rheocasting, Compocasting)	41
5.1.8.1. Реокастинг поступак (Rheocasting)	41
5.1.8.2. Компокастинг поступак (Compocasting).....	42
5.1.9. Инфилтрација метала под ниским притиском (Pressureless Metal Infiltration)	44
5.1.10. Спреј поступак (Spray Deposition).....	45
5.1.11. Брзо очвршћавање (RSP Rapid-Solidification Processing).....	46
5.1.12. Физичко таложење из гасовите фазе (PVD Physical Vapour Deposition).....	46
5.2. ДОБИЈАЊЕ КОМПОЗИТА СА ПОЛИМЕРНОМ ОСНОВОМ	47
5.2.1. Намотавање (Filament Winding).....	47
5.2.2. Ливење	48
5.2.3. РТМ поступак (RTM Resin Transfer Moulding)	48
5.2.4. Пултрудирање (вучење-екструзија)	49
5.2.5. Напрскавање.....	50
5.2.5. Ручно полагање (аутоматско ламинирање).....	50
5.2.5. Вакуумско спајање	51
5.2.6. Други процеси убризгавања (SCRIMP, RIFT, VARM, ...)	52
5.2.7. Препрег.....	52
5.2.8. Инфузија слоја смоле (RFI - Resin Film Infusion).....	54
5.3. ДОБИЈАЊЕ КОМПОЗИТА СА КЕРАМИЧКОМ ОСНОВОМ	55

5.3.1.	ЦВД напаравање (CVD - Chemical Vapour Deposition).....	55
5.3.2.	Усмерена оксидација метала	56
5.3.3.	Производња SiC/SiC композита импрегнацијом полимера и пиролизом	56
5.3.4.	Инфилтрација истопљеног материјала.....	57
5.4.	Добијање угљеник-угљеник (C-C) композита.....	57
5.4.1.	Добијање C-C композита пиролизом чврсте масе	57
5.4.2.	Добијање C-C композита пиролизом течне масе.....	58
5.4.3.	Добијање C-C композита пиролизом гасовите масе	58
5.5.	Слојевити композитни материјали.....	58
5.6.	Сендвич конструкције.....	60
5.6.	Поступци производње биокмпозита	62
6.	ПРИМЕНА КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА	63
6.1.	ПРИМЕНА КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА У АУТОИНДУСТРИЈИ	65
6.2.	ПРИМЕНА КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА У АВИОИНДУСТРИЈИ.....	66
6.3.	ПРИМЕНА КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА У МЕДИЦИНИ.....	68
6.4.	ПРИМЕНА КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА У СПОРТУ	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
7.	ЗАКЉУЧАК	72
	ЛИТЕРАТУРА	74

1. Увод

Инжењери пројектују и производе различите предмете са одговарајућим употребним вредностима од тзв. техничких материјала. Зависно од намене предмета коришћени технички материјали морају да имају одговарајућу чврстоћу, изолациона својства или својства добре проводности топлоте и електрицитета, да генеришу магнетно поље или не прихвате магнетни флуks, да апсорбују или рефлектују светлост, спрече продор нуклеарног зрачења, да егзистирају у неприродном окружењу у условима експлоатације, а да при томе не угрожавају природну средину или коштају превише.

Очигледно је живот човека неминовно повезан са употребом разних предмета у виду инжењерских производа, па се тако долази до сазнања о великој важности техничких материјала, о којој речито говори Отингера изрека (A. G. Öttinger):

“...без материјала ништа не постоји, без енергије се ништа не збива и без информација ништа нема смисла”.

У складу са оваквим закључцима могла би се усвојити дефиниција техничких материјала у следећем облику: материјали су супстанце које човек употребљава за израду предмета и објеката, да би побољшао услове свог живота.

Материјали су суштински уграђени у култури човечанства - толико да су присутни у свеукупним човековим делатностима: транспорту, грађевинарству, машиноградњи, производњи одеће, комуникацијама, рекреацији, производњи хране... Историјски посматрано, развој и просперитет људског друштва био је блиско повезан са способношћу човека да произведе и преради материјале како би задовољио своје потребе.

Раније су се материјали делили у три велике „класичне“ групе:

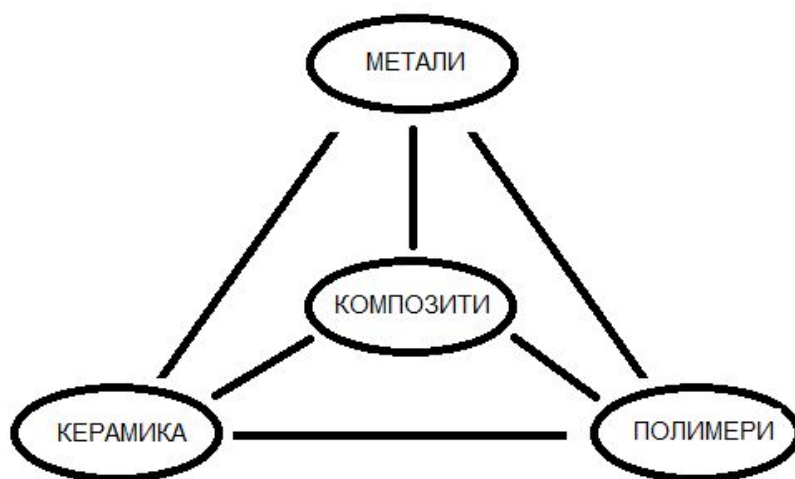
- **Метале** - Ови материјали су изграђени од једног или више металних елемената, а могу садржати и неке неметалне елементе (C, N, O). Како метали имају велики број слободних електрона, многа својства метала су у директној зависности од њих. Метали имају кристалну структуру у којој су атоми међусобно распоређени у простору градећи кристалне решетке. Метали поседују изузетно добру електричну и топлотну проводљивост; имају способност да загревањем отпуштају електроне; не пропуштају светлост; полиране површине су сјајне. Имају релативно добру чврстоћу и пластичност на собној температури, а многи задржавају добра својства и на повишеним температурама. Чисти метали имају ниску чврстоћу и не обезбеђују потребна механичка, физичка и технолошка својства, те се они ретко примењују. Ширу употребу у инжењерској пракси имају легуре. Легуре поседују углавном сва својства која су карактеристична за метале.
- **Полимере** - Већина полимерних материјала састоји се од органских једињења која садрже угљеник, водоник и друге неметалне елементе. Структура полимерних материјала је некрystalна, мада неки од њих могу да имају комбиновану – некрystalну и кристалну структуру. Карактеристике полимерних материјала су : мале вредности густине, ниска топлотна и електрична проводљивост, ниске вредности чврстоће и

крутости, висока постојаност на хемијски утицај, висок коефицијент термалног ширења.

- **Керамичке материјале** - Керамички материјали су неорганска једињења метала и неметала. Структура керамичких материјала може да буде кристална, и комбинована кристално-некристална. За керамичке материјале карактеристично је да су: веома тврди, крти, поседују високу чврстоћу на високим температурама, отпорни су на хемијске утицаје, храну и околину, отпорни су на хабање, имају веома ниску електричну и топлотну проводљивост.

Данас се тим групама додаје и четврта велика група: композити или композитни материјали. Однос ових група је приказан следећом сликом (слика 1.). У односу на "традиционалне" материјале композити поседују бројне предности:

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



Слика 1. Однос композитних и класичних материјала

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** (*Matrix* – енг.) и она окружује и држи заједно групе влакана или фрагменте ојачивача. Основна улога матрице је да:

- осигура добро повезивање са осталим компонентама,
- формира и осигурава спољашњи облик конструктивног елемента,
- осигура заштиту осталих компоненти од спољашњег утицаја.

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**. Карактеристике ојачивача је да обезбеђује композиту:

- велику чврстоћу и тврдоћу,
- велику еластичност или крутост,
- остале захтеване карактеристике (електропроводљивост, топлотна проводљивост, ударна жилавост, ...).

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 (у суштини) не растварају један у другом.

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

У инжењерском пројектовању под композитним материјалом 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 ужем смислу под композитним материјалом се подразумева спектар материјала који морају задовољити следеће критеријуме:

- композитни материјали морају бити производ човечијег рада (из чега произилази да ни један природан материјал, нпр. дрво, није композитни материјал);
- композитни материјали морају бити састављени од најмање два материјала са јасном границом раздвајања између њих;
- композитни материјали морају имати својства која нема ни једна компонента појединачно.

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

2. Композитни материјали кроз историју

2.1. Композитни материјали пре композитних материјала

Постоје природни композити међу материјалима који су присутни у природи. Дрво је природан композитни целулозних влакана у матрици од лигнина. Такође је кост природна мешавина калцијумових влакана који су спојени заједно у природној матрици.

Још 1500 година пре нове ере Египћани су користили мешавину сламе и глине као материјал за производњу цигле.

Проналазак цемента (Roman cement – римски цемент у старом Риму, касније Portland cement у савременој Енглеској) омогућава израду најпре обичног (неармираног) бетона (честице песка и камена повезане цементом), касније армираног (ојачаног челичним жицама, сајлама, ...) бетона, што су композитни материјали (и данас) у масовној примени.

2.2. Када је почела модерна индустрија композита

Иако су композитни материјали били познати у различитим облицима током историје човечанства, историја модерних композита вероватно је почела 1937, када су трговци из фирме „Овенс Корнинг фиберглас“ (Owens Corning Fiberglass Company) почели да продају фиберглас заинтересованим странама у САД. Фиберглас (Fiberglass али и fibreglass, у смислу савитљиво стаклено влакно, често се користи и израз „стаклопластика“) је пронађен готово случајно 1930., када је неки инжењер био заинтеригиран влакнима која су формирана током процеса израде стаклених флаша за млеко.

Фирма „Овенс Корнинг фиберглас“ је основана 1935. године од стране „Овенс-Илиноис“ (Owens-Illinois) и „Корнинг Глас Воркс“ (Corning Glass Works) како би комерцијално искористили ову нову врсту влакнастих материјала. Јапанска компанија Нито Босеки (Nitto Boseki) је такође производила фиберглас и покушавала да се пробије на тржишту влакана у Јапану и САД. Почетни производ од ових фино извучених влакана истопљеног стакла је у облику плоча за изолацију (стаклена вуна), али ускоро следи и производња и продаја конструкционих елемената.

Продавци фибергласа су схватили да је ваздухопловна индустрија вероватни купац за ову нову врсту материјала, јер су настајале многе мале и енергичне авиокомпаније. Изгледало је да стварање нових авиона и иновативних концепата у њиховој производњи готово свакодневне, а многе од ових иновација захтевају нову материјале.

Једна од таквих компанија, Даглас Еркафт (Douglas Aircraft), купује прве ролне фибергласа испоручене на западној обали, јер су веровали да ће им фиберглас помоћи да реше проблеме у производњи. Они су имали уско грло у изради металних калупа за њихов процес извлачења лима (који су назвали формирање хидропресама). За промену дизајна сваког авиона потребне су нови облици у металним калупима што је скуп и дуготрајан поступак. Дагласови инжењери покушали са применом пластичних калупа,

али они нису могли да издрже оптерећења процеса ковања. Размишљали су да ако пластичне калупе ојачају стакленим влакнима, тако да буду довољно јаки да произведу бар неколико делова, да се тако може брзо потврдити нови дизајн. Ако би се делови показали прихватљиви (употребљиви), онда би се могао изградити метални калуп за пуни производни циклус. У сарадњи са фирмом „Овенс Корнинг фиберглас“, убрзо је извршена примена новог фиберглас материјала и фенолних смола (смола доступна само у то време). Потпуни успех! Ојачана пластика убрзо постаје стандард за израду прототипних делова.

Друге апликације у алатима за ваздухоплове ускоро следе. Многи од алата (сита и решетке) за формирање и одржавање делова и склопова авиона треба да буду јаки, танки и високо тачног облика (често са сложеним кривинама). Метал није могао лако да испуни све ове критеријуме и тако фибергласом ојачани феноли постају жељени материјал за многе од тих производних алата авионских апликација.

Не дуго после тога, незасићене полиестерске смоле постају доступне (патентирано 1936. године) и на крају (иако не одмах, због релативне лакоће у производњи ове смоле у односу на фенолне) настала је група смола. Пероксид производни системи су већ доступни, бензол пероксид је патентиран 1927., лауроил пероксид – 1937., као и многе други пероксиди - одмах после тога. Боље перформансе система смола постају доступне са проналаском епоксидне смоле 1938. године. Материјали и њихова примена изгледа као да конвергирају у исто време.

2.3. Други светски рат и развој композитних материјала

Већ брз темпо развоја композита убрзан је током Другог светског рата.

Не само да су се још више авиона развија и, стога, композита је више у широкој употреби алата, али за коришћење структурних композита и полуструктуралне делова који се истражују и који бивају тада усвојени. На пример, у безумним данима рата, један од последњих делова на авиону који су дизајнирани су канали. Пошто су сви остали системи већ фиксирани, пролази који су потребни да иду око других системима, што често доводи до канала које су вибрирали, увртали се, окретали - смештени у најтеже приступа места. Метални канал једноставно није могао лако да се изведе у овим „страшним“ облицима. Чини се да је одговор на овај проблем био: композити. Композитни канали су ручно прављени - на гипсаним шупљим (цевастим) трновима који су направљени у жељеном облику. Затим, након што су заливени смолом, трнови су поломљени и одвојени од композитних делова. Буквално хиљаде таквих канала су направљени у бројним производним погонима окупљеним око производње авиона, у монтажним објектима.

Остали делови са почетка Другог светског рата укључују гондоле мотора које олакшавају авион А-20 (као и радарске куполе за заштиту антене радара авиона) који је дао структурну јачину и радарску транспарентност. Фенолом ојачан папир је од тада коришћен да би се формирала структурна кутија крила и бока авиона ПТ-19 (РТ-19). Током раних ратних година са Ваздухопловним снагама САД (US Air Force) је уговорена производња пластичних авионских седишта, за шта су коришћена влакна чешљаног памука импрегнирана уреом и полиестером.

Од не-авионских делова од онда се производе памук-фенолни бродски лежајеви, азбест-4 фенолна постројења, памук/азбест-фенолне кочионе облоге, памук-ацетат корице бајонета, и хиљаде других.

Рани ратни период је обележила прва производња брода ојачаног фибергласом од стране Басонс индустрије (Basons Industries). Међутим, лајсне корита брода, део који није могао да се одвоји од корита брода али ни да се извади из калупа без разбијања калупа је направио велике проблеме. Како ни после много покушаја одвајања дела из калупа није успео, цео склоп је бачен у реку Бронкс.

Приближно у то време (1942), америчка влада се забринула да нема довољне расположиве залихе метала за ваздухопловство па су упућени инжењери произвођача композитних делова у САД у ваздухопловну базу Рајт Патерсон (Wright Patterson) како би испитали могућности замене истих материјала композитним материјалима.

Особље базе Рајт Патерсон је било расположно да промовише коришћење композита у развоју нових облика дизајна, подстицањем развоја нових композитних материјала и апликација, и користећи своју стручност у развоју нових и смелих композитних делова. Можда најхрабрија примена је била у развоју авионског крила за два школска авиона за обуку: АТ-6 и БТ-15. Укупно шест парова крила су направљени, постављени на авионе, и успешно се њима летело. И поред успеха овог пројекта, структурни делови авиона нису прављени наредних 50 година. Још невероватније, након 50 година паузе, начин израде делова је скоро истовестан начину израде развијеном у ваздухопловној бази Рајт Патерсон 1942. године.

Многа друга композитна побољшања су развијени током Другог светског рата, укључујући неке иновативне производне методе, као што су намотавање и напрскавање (winding and spray-up). Сендвич структуре, коришћење хелијског језгра, ватроотпорни композити, и разни други материјали су развијени том прилоком.

2.4. Развој после Другог светског рата

Крајем ратних напора многе компаније који су били активне у производњи ратног материјала су суочене са болним проблемом. Било им је потребно да брзо препознају нова мирнодопска тржишта и нове производе за које би искористили своју стручност у развоју. Компаније као што су Голдсворт Инжењеринг (Goldsworthy Engineering) су покушавале да добијају подршку од компанија које производе фиберглас који би „спонзорисале“ неке пројекте, којих су се могли сетити, и чији саставни део су били делови од фибергласа. На пример, произвођачи фибергласа ће платити за примену нових композитних алата како би смањили своје трошкове развоја.

Неки од ратних пројеката усмерени су директно у комерцијалну производњу, као што су нпр. фиберглас армирани полиестерски бродови. До 1948. године произведено је неколико хиљада комерцијалних бродови.

Скоро сви су се сложили да је повећана тражња за аутомобилима логичан захтев за композите. До 1947. потпуно композитнио тело (каросерија) аутомобила је направљено и тестирано. Овај аутомобил је био прилично успешан и довео 1953. године до развоја Корвете (Corvette) која је направљена помоћу фибергласа предформе које су импрегниране смолом и обликоване у металним калупима. Доминантан метод обликовања делова аутомобила било је пресовање сложених модела или ливење масивних делова. Мешавина ових делова са композитним материјалима је развила још 1948. године Галстик корпорација (Galstic Corporation).

Једна иновација која заслужује посебну пажњу је ауто-авион развијен од Конвер Еркафт компаније (Convair Aircraft Company). Конвер је сматрао да многи ратни пилоти повратници желе да наставе са летењем, али такође желе и да га комбинују са

породичним одмором. Дакле, Конвер је направио аутомобил-авион од потпуно композитне каросерије (због уштеде тежине) на коју је могуће прикачити посебан склоп крила. Крила ће бити на располагању за изнајмљивање на разним аеродромима, тиме дозвољавајући возачу-пилоту да изнајме склоп крила на једном аеродрому, одлети на одмор на следећи аеродром, тамо скину крила, и пут наставе возећи ауто. Прототипови су направљени и успешно демонстрирани. Колико би то било повољно данас за Лос Анђелес, иако небо може бити опасније од путева.

Неки од производа израђених у послератном периоду се сада појављују на великим тржиштима композитних материјала. Ово укључује каде и туш кабине, некорозивне цеви, делови апарата, тацне, складишта, контејнере и намештај. Други композитни производи су и успешни, иако не тако добро познати или очигледни. На пример, постолја за забаву група и сценских продукција, нарочито путујућих, оних као Ајс Фолис (Ice Follies - Лед лудости), су направљене од композита. У филму „Капетан од Кастиља“ (Captain from Castile) оклопи и кациге на шпанским војницима су направљене од композита и осликане тако да личе на метал. Марама обмотана око главе Астека је такође била од композита. Данас је употреба оваквих материјала у индустрији забаве (позоришној, филмској, ТВ, ...) незаобилазна.

Неколико иновативних производних метода је развијено у касним 1940-им и почетком 1950-их, укључујући лајсне вакуум кеса и намотаја надуваних влакана.

2.5. Ваздушно-космички простор

Притисак за авио доминацију која је почео 1950-их и убрзао 1960-их је био нови подстицај за развој композита. Ричард Јанг (Richard Young) у фабрици Келог (W. M. Kellogg Company) је почео да користи композит за намотавање правећи мале ракетне моторе. Ову технологију је купио Херкулес (Hercules) и била је основа за развој и производњу великих ракетних мотора, који су били срце у свемирској трци. До 1962. године потреба за великим ракетним моторима постала је очигледна па је инжењер у Херкулесу - Лари Ештон (Larry Ashton) основао ЕТ (Engineering Technology - инжењерску технологију) за производњу ових уређаја. (ЕТ је кренула од почетног новца оснивача који је исти добио продајом своје крви у Банци крви. Све што је добио за крв уложио је у Компанију).

Шиндо (A. Shindo) добија 1961. године патент за експерименталну производњу првог угљеничног (графитног) влакна али фирма Коурталдс Лимитид (Courtaldis Limited) из Велике Британије успева да прва произведе комерцијално одржива угљенична влакана неколико година касније. Овим влакнима део крутости на тежини је побољшан и уведено је још више композитних делова у авион. Можда крунски драгуљ овог периода (1978) био је (од стране Ештона) развој првог потпуно композитног трупа ваздухоплова (коришћењем ране технологије влакана), Бич Старшип (Beech Starship). Авион је успешно полетео, али није комерцијализован. Многи стручњаци и даље верују да је технологија намотавања угљеничних влакана и најбољи метод за производњу малих млазних авиона.

2.6. До данас

Проналажена су нова влакна: бор влакна постају доступна од 1965. године, арамидна влакна - Кевлар (Kevlar®) које комерцијално нуди фирма ДуПонт (DuPont) од 1971. године, влакна направљени од полиетилена крајње високе молекуларне масе (ultra high molecular weight polyethylene) су развијени почетком 1970. Ова влакна високих перформанси, заједно са стакленим и угљеничним влаканима, довели су до огромних промена у: авио-индустрији, заштитним оделима - оклопима (структурним и личним), спортској опреми, медицинским апаратима, и многим другим деловима високих перформанси.

Развој нових и побољшаних смола је такође допринео ширењу тржишта композита, посебно за делове који раде у вишим температурама и где је потребна висока отпорност на корозију.

Данас је тржиште композита широко. Као што је недавно од стране СПИ Композит института (SPI Composites Institute), највеће тржиште је још увек у саобраћају (31%), али и грађевинским конструкцијама (19,7%), поморству (12,4%), електричној и електронској опреми (9,9%), уређајима широке потрошње (5,8%), а апарати и пословна опрема су такође велико тржиште. Авио/свемирско тржиште представља само 0,8%, што је изненађује у светлости важности у пореклу композита. Наравно, авио производи су малобројнији, али су много веће вредности.

Већина тржишта ће наставити да расте. Композити су нашли своје место у свету и чини се да стекли свој удео на тржишту, посебно у производима у који имају критична перформансе. Неки од тих производа су веома нови, али зар није интересантно да је грађевинарство и даље главно тржиште за композитне материјале, баш као што је то било 1500 година пре нове ере када су Египћани користили сламу да појача цигле од блата.

3. Врсте и подела композитних материјала

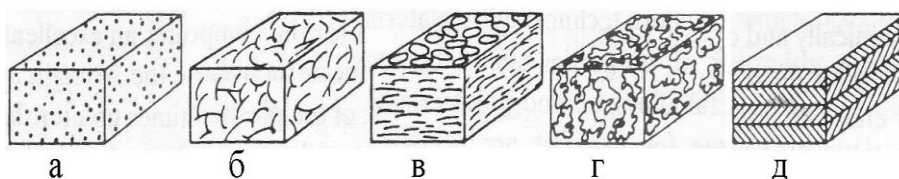
Композити се могу класификовати на више начина.

3.1. Поделе 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 требају да буду што чвршћи и крући. Стога се за влакна преферирају материјали високе специфичне чврстоће и високе специфичне крутости (специфични модул еластичности).

Посматрано у односу на микроструктуру грађе композита (слика 3.1.), може се извести подела на:

- композите ојачане дисперзним честицама (Particulate composite) (слика 3.1.а);
- композите ојачане влакнима (Fiber composite) (слика 3.1.б)
- композите ојачане љускама/плочицама (Flake composite) (слика 3.1.в)
- композите ојачане зрнима (Filed composite) (слика 3.1.г)
- композите ојачане тракама-ламелама (Laminar composite) (слика 3.1.д) – слојевити (ламинарни) композити



Слика 3.1. Подела композита према грађи

Слојевити композити и сендвич конструкције припадају групи тзв. **структурних композита**.

Наведени типови структура се могу добити на:

- субмикроскопском (пречник честица, пречник влакана или дебљина слоја/ламеле мањи од $1\mu\text{m}$ – дисперзно ојачане легуре и композити са монокристалним влакнима-вискерима),
- микроскопском (пречник честица, пречник влакана или дебљина слоја/ламеле од $1\mu\text{m}$ до $100\mu\text{m}$) и
- макроскопском (пречник честица, пречник влакана или дебљина слоја/ламеле преко $100\mu\text{m}$ – легуре бакра и алуминијума ојачане волфрамовом и челичном жицом) нивоу раздвајања граница фаза.

Вискери (енг. Whiskers) су кратка влакна, изразито велике чврстоће, пречника до $10\mu\text{m}$ и дужине до 0.1 m . Њихова чврстоћа теоретски може износити и до $1/10$ модула еластичности. Вискери могу бити од графита (угљеника), SiC, SN, TiB, Al_2O_3 , ...

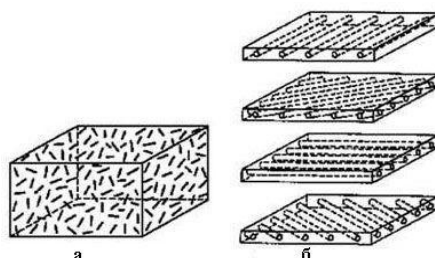
Дисперзно ојачани композити садрже секундарне фазе у облику финих честица које су статистички случајно равномерно распоређене у основи. Порекло честица може бити и ендегено (нпр. честице настале оксидацијом реактивног елемента у металној основи – ојачани композити). Од честица се сусрећу оксиди, нитриди и карбиди: Si_3N_4 , SiC, AlN, TiB_2 , B_4C , BN, итд. У највећој употреби је SiC због стабилности у низу

оксидних и неоксидних керамичких матрица, а нарочито у примени код брусних алата – као резни елемент (због тврдоће).

Честице од тврдог и кртог материјала су равномерно распоређене у мекој и дуктилној матрици. С обзиром на величину честица и начин на који утичу на укупна својства разликујемо композите с дисперзијом (честице $<0,1 \mu\text{m}$) и композите са великим честицама (честице $>1 \mu\text{m}$). Код композита са дисперзијом запремински удео честица се креће до $0,15 \text{ mm}$, а за композите са великим честицама тај је удео већи од $0,2 \text{ mm}$.

Једна од најважнијих разлика између композита са честицама и оних са влакнима директно произлази из њихове грађе. Композити са честицама углавном су изотропни, тј. њихова својства (чврстоћа, крутост итд.) идентична су у свим смеровима, за разлику од композита са влакнима који су често анизотропни па својства варирају с обзиром на положај влакна. Анизотропност се може деломично отклонити слагањем више слојева ојачања различите оријентације при чему се добија слојевити композит.

У влакнастим композитима (слика 3.2.) секундарна фаза је у облику влакана (Fibers) која могу бити или прекидна (кратка Short Fibers) и дискретно распоређена у основи (слика 3.1.а) или непрекидна (Continuous Fibers) и исто усмерена (слика 3.1.б).



Слика 3.2. Распоред влакана у композиту

Зависно од распореда влакана варирају својства композита. У случају континуирано усмерених влакана својства композита могу бити врло анизотропна тако да је у смеру влакана чврстоћа висока, а вертикално на њих значајно нижа. Изотропнија својства сусрећу се код композита ојачаних случајно усмереним кратким влакнима.

Влакна по свом пореклу могу бити:

- органског (биолошког, природног) порекла:
 - биљна:
 - влакна стабла: лан, јута, конопља, бамбус, ...
 - влакна листа: сисал, абака (банане), ...
 - влакно плода: памук, капак, коир (кокос), ...
 - животињска: длака, вуна, тетиве, ...
- неорганског (вештачког) порекла:
 - неорганска: метал, стакло, керамика, азбест, ...
 - синтетичка: полиестер (Polyester), полиамид (Polyamid, Nylon), акрил (Acrylic), полиолефин (Polyolefin), спандекс/еластин/ликра (Spandex/Elastin, Lycra), ...
 - рециклирано ојачана:
 - на целулозној основи: свилена влакна (Cupra Rayon), вискозна влакна (Viscose Rayon), целулозна влакна (Celulose Rayon), бамбусова вискоза (Bamboo Viscose), ...
 - на протеинској основи: протеини соје, ...

Табела 3.1. Механичка својства неких органских и неорганских влакана

Врста влакна Fibre source	Пречник влакна Diameter	Густина Density	Истезање Elongation	Затезна чврстоћа Tensile strength	Модул еластичности Tensile modulus
	d [μm]	ρ [g/cm ³]	ε [%]	Rm [MPa]	E [GPa]
Биљна влакна					
памук / Cotton	-	1,5-1,6	7,0-8,0	287-800	5,5-12,6
јута / Jute	-	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5
лан / Flax	-	1,5	2,7-3,2	345-1035	27,6
конопла / Hemp	-	1,5	1,6	690	70,0
рамија / Ramie	-	1,5	1,2-3,8	400-938	61,4-128
сисал / Sisal	-	1,5	2,0-2,5	511-635	9,4-22,0
кокос / Coconut coir	-	1,25	30	175-220	4,0-6,0
меко дрво / Soft wood	-	1,5	-	1000	40,0
Стаклена влакна					
Е-влакна / E-glass	-	2,54	2,5	2000-3500	76,0-79,0
Е-влакна / E-glass	14	2,54	3,2	3450	72,4
С-влакна / C-glass	-	2,49	4,8	3160	69
С-влакна / S-glass	-	2,48	2,8	4400-4570	88,0-91,0
С-влакна / S-glass	10	2,49	5,7	4590	85,5
кварц / Quartz	-	2,15	-	3400	69,0
Полимерна и арамидна влакна					
LM	-	1,39	-	3000	70, 0
IM	-	1,45	-	3100	121,0
HM	-	1,47	-	3500	179,0
Кевлар-29	12	1,44	4	2760	62
Кевлар-49	12	1,479	2,8	3790	131
Полиетилен	38	0,97	5	2580	117
Угљенична влакна					
Rayon	6,5	1,66	2,5	620-2200	41-393
Смола / Pitch	11	2,02	0,9	1720	345
Полиакрилнитрил / PAN - IM	9	1,8	1,0	2930	276
Полиакрилнитрил / PAN - HM	10	1,9	0,5	2900	400
Полиакрилнитрил / PAN - UHM	10	1,86	0,4	1720	517
SM	-	1,74	-	3600	228,0
HT	-	1,82	-	7100	294,0
UHM	-	2,18	-	3100	966,0
Метална влакна					
челик са 0.9 %C	100	7,8	-	4250	210
берилијум	-	1,85	-	1260	300
волфрам	25	19,3	-	3850	360
SiC	100-200	3,3	-	3500	430
Al ₂ O ₃	20	3,95	-	1400	379
бор / Boron	100-200	2,6	-	3800	385

LM - умерени модул еластичности

IM - умерени модул еластичности

SM - стандардни модул еластичности

HM - висок модул еластичности

UHM - врло високи модул еластичности

HS - висока чврстоћа

HT – висока затезна чврстоћа

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

Стакло је врло популаран материјал за ојачавање из неколико разлога:

1. лако се извлачи из растопљеног стања у облику влакана велике јачине;
2. економична је производња композита ојачаног стаклом;
3. уграђивањем чврстих стаклених влакана у полимерну матрицу добија се композит врло високе специфичне чврстоће;
4. могућност комбиновања стаклених влакана са различитим полимерним матрицама чиме се постиже хемијска инертност и омогућује примена у корозивној околини.

Стаклена влакна су беле или прозирне боје, високе су чврстоће, али нису крута што делимично ограничава њихову примену. Надаље, 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 чистоће која у комбинацији с високотемпературном полимерном матрицом, као што су полиимидне смоле, могу поднети температуре до 300 °C.

Стаклена се влакна производе најчешће од песка (силицијумовог диоксида SiO_2) различитим поступцима и по правилу имају слабија механичка својства од угљеничних влакана. Но врло су раширена у примјени код механички мање захтевних конструкција због њихове мање цене. Могу се знатно разликовати по својствима те се стога означавају као

- **А-стакло** - оваква су била прва произведена влакна, данас се врло ретко користе, високо алкално, добра хемијска отпорност, слаба електрична својства;
- **С-стакло** - користе се због побољшане отпорности на киселине и базе;
- **Е-стакло** - најчешће кориштено, побољшана отпорност на влагу и блаже хемикалије, као и отпорност на утјецај морске воде (бродоградња). Више од 50 % свих стаклених ојачивача;
- **S-стакло** - повећане чврстоће и модула еластичности, користе се код механички оптерећенијих конструкција гдје су потребни висока специфична крутост и чврстоћа (чврстоћа 30% већа од Е-стакла, боља R_d , 3-4x скупље од Е-стакла);
- **D-стакло** – ниска диелектрична константа, лоша механичка својства;
- **T-стакло** – употреба за температуре до 1050 °C, виша R_m и E .

Осим стаклених влакана као ојачивача се могу користити и **полимерна и арамидна влакна** која су високочврста и висококрута, врло доброг односа чврстоће и густине. Прва арамидна влакна произведена су 1965. године у лабораторијама компаније Дипон (Du Pont) под комерцијалним називом Кевлар. Влакна су позната и под трговачким називом Nomex. Постоји више разних типова арамидних влакана (Кевлар 29, 49, 149) која се разликују по механичким својствима.

Полимерна влакна су једина од набројених која су у потпуности вештачки створена. Међу њима су најпознатија Кевларска влакна, а у последње време се користе и полиимиди због могућности коришћења и на повишеним температурама (и преко 300 °C). Полимерна влакна се састоје од полимерних ланаца који се посебним поступцима издужују у правцу пружања влакана. Њихова својства су непосредна последица њихове микроструктуре. Будући да полимерни молекули стварају раванске површине велике

крутости, које су међусобно повезане slabим водоничним везама, читав изглед влакна је врло сличан оном радијалног распореда код угљеничног влакна. Стога Кевларска влакна имају низак модул смицања у уздужном смеру, слаба својства у попречном смјеру као и малу уздужну притисну чврстоћу, због slabих водоничних веза међу равнинама. С друге стране одликују их добра уздужна затезна чврстоћа (R_m – преко 3000N/mm^2), добра хемијска отпорност и топлотна постојаност, висока отпорност на хабање те мала густина ($\rho=1,44\text{g/cm}^3$).

Арамидна влакна чије име долази од ароматичних полиамида припадају групи пластомера, али за разлику од пластомера који се мекшају и топе при повишеним температурама ова влакна су стабилна у подручју повишених температура. Арамидна влакна задржавају механичку отпорност при температурама од -200 до $200\text{ }^\circ\text{C}$. Влакна су карактеристичне жуте боје, хигроскопна, релативно слабе адхезијске везе с матрицом, скупља 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. Користе се за ткање платана (влакна му нису крта), која су основа за израду многих отпорних љускастих елемената (нпр. 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 не мање важно, отпорна на паљење.

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

1. угљена влакна имају највећу специфичну крутост и највећу специфичну чврстоћу од свих влакнастих ојачивача;
2. високи вучни модул еластичности и високу чврстоћу задржавају и при повишеним температурама;
3. влакна су отпорна на влагу и низ течности, киселина и база;
4. развијени су релативно јефтини поступци производње влакана и композита.

Угљена 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, но поступак је убрзо избачен због малог постотка угљеника који се на тај начин добијао, као и slabих механичких својстава. Већина угљеничних влакана која се користе у авионским и другим конструкцијама су направљена из полиакрилонитрил (PAN) влакана или из различитих смола (енгл. Pitch) процесом угљенификације, при чему се поступци производње могу значајно разликовати. PAN поступком се производе влакна с процентом C до 50 % док се влакна из смоле одликују процентом C до 80 %.

Према основним механичким карактеристикама, угљенична се влакна класификују као HM (високог модула еластичности), HS (високе чврстоће) и IM (умереног модула еластичности) - понекад се користи и ознака UHM (врло високи модул еластичности). Влакна добивена из смоле генерално имају већи модул еластичности, али и мању чврстоћу при сабијању и затезању у односу на PAN влакна. Ова су влакна и знатно више порозна, што додатно утиче на њихову чврстоћу. Влакна од смоле могу имати и добру електричну проводљивост, просечног су пречника $10\text{--}11\text{ }\mu\text{m}$, за разлику од PAN влакана пречника $5\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$. У попречном пресеку, угљенична влакна могу имати радијални облик (базалне равни су радијално усмерене), облик

концентричних слојева (базалне равни концентричне), трансверзално изотропни или језгро и спољашњу љуску (најчешћи облик, карактеристичан за PАН влакна).

Према крутости ова се влакна 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).

Угљена влакана ултрависоког модула еластичности поседују највишу крутост од свих влакнастих ојачивача, а она средњег модула еластичности највише су чврстоће међу свим познатим влакнима, (видети табелу 3.1.).

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 с полимерном матрицом.

Композити угљеничног ојачања користе се на пример за израду намотаваних кућица ракетних мотора као и бројних других конструкцијских елемената војних и комерцијалних летелица (нпр. делови крила, тела, стабилизатора и компоненти за управљање).

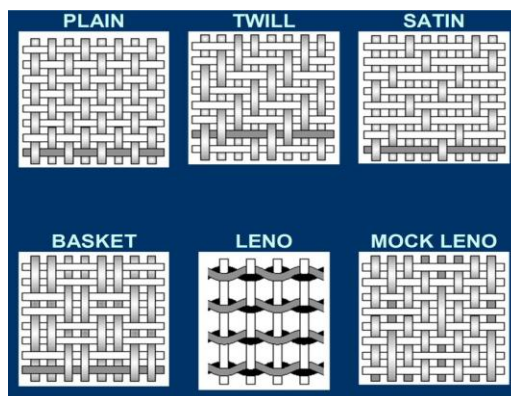
Осим стаклених, угљеничних и арамидних влакана, која су најчешћи ојачивачи полимерних композита, могу се користити и друге врсте као што су влакна бора, влакна на основи силицијум карбида (SiC) или она на бази алуминијум оксида (Al_2O_3). Композит са влакнима бора користи се нпр. у изради специфичних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

Посебну скупину чине **борови** (енгл. Boron) **влакна**. Ово су сама по себи композитна влакна будући да је посебним поступком напаравања бор нанесен на основно угљенично (израђено из смоле) или волфрамово влакно. Борова влакна имају знатно већи пречник (125-140 μm) у односу на друге врсте влакана (нпр. угљенично пречника 10 μm). Због врло високе тврдоће бора, ови се композити врло тешко накнадно обрађују (нпр. бушење или резање), што је уз високу цену, главни разлог што су их у ваздухопловним конструкцијама у потпуности истиснули композити с угљеничним влакнима. Борова су се влакна користила у неким од 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 с металном матрицом (енгл. Metal Matrix Composites - MMC), 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 (енгл. Chemical Vapor Deposition - CVD). Ова су влакна посебно погодна за ојачавање метала (алуминијских и титанијумских легура) као и ојачавање керамике у форми влакна од силицијум угљеника, силицијумовог нитрида или стакла. У другом се облику ова влакна израђују од полимера који садрже силицијум и угљик, једно од таквих влакана познато је под трговачким именом Nicalon или у побољшаној верзији Hi-Nicalon. Ова влакна имају и својство полупроводност - 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 повишеним температурама.

Осим појединачним влакнима ојачавање се може остварити и различитим тканинама односно тракама направљеним 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 (влакана) под одређеним углом. Најчешће врсте ткања приказане су на слици 3.3. **Plain** - равно ткање, **Twill** – рибља кост (кепер) ткање, **Satin** – савитљиво ткање, **Basket** – двонитно равно ткање, **Leno** - једнолично ткање око основе, **Mock Leno** – лажно једнолично ткање



Слика 3.3. Неки од начина ткања

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

3.2. Поделе композита на основу матрице

Основне функције матрице јесу:

- преношење оптерећења на влакно,
- одвајање влакана једних од других у сврху спречавања ширења пукотина у материјалу,
- формирање спољашњег облика композитне конструкције,
- заштита композита од утицаја околине.

Својства матрице (табела 3.2.) изразито су важна за одређивање уздужне притисне чврстоће, попречне влажне 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 (нпр. средства за скидање боје). За композите се тражи да добро подносе температуре до 150 °С, изузетно и до 200 °С. 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 својстава, те њена својства значајно одређују понашање композита. Врло је битно физичко својство температура преласка у круто стање - ГТТ (енгл. Glass Transition Temperature - GTT) која дефинише тачку преласка из вискозног у круто стање матрице. Ова температура битно дефинише коначна својства матрице. Наиме, 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 (слика 3.4.): неметали, керамике и стакла, метали и легуре, полимери. У зависности од врсте конституента имамо:

- металне композите ММЦ (MMC Metal-Matrix Composite),
- полимерне композите ПМЦ (PMC Polymer-Matrix Composite),
- керамичке композите ЦМЦ (CMC Ceramic-Matrix Composite).



Слика 3.4. Групе композитних материјала

Од њихових особина, заступљености, расподеле и везивања зависиће својства новонасталог материјала. Све композите карактеришу неке заједничке одлике које 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 инертност, могућност обраде и обликовања у разноврсне облике, издржљивост и постојаност.

Табела 3.2. Механичка својства неких материјала матрице

Врста матрице Matrix	Густина Density ρ	Истегање Elongation ε	Затезна чврстоћа Tensile strength Rm	Модул еластичности Tensile modulus E	Модул смицања G
	$[\text{g/cm}^3]$	$[\%]$	$[\text{MPa}]$	$[\text{GPa}]$	$[\text{GPa}]$
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 (BMI)	1,32	6,6	78	3,6	1,8
Полиимид	1,89	3	120	4,9	-
Полиетер имид	1,27	60	105	3	-
Полиамид имид	1,40	12-18	95-185	5	-
PPS	1,34	3	70-75	3,3	-
полиетеретеркетон (PEEK)	1,32	150	92-100	-	-
Полисулфон (PS)	1,24	50-100	70-75	2,5	-
Полипропилен (PP)	0,90	300	25-38	1-1,4	-
Поликарбонат (PC)	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	-

3.2.1. Метални композити ММЦ

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 магнезијумских и алуминијумских легура посебно погодних у ваздухопловству. Ојачавањем металне матрице појачалима 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 пузању. 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 с металном матрицом у начелу се састоји од најмање два корака. Први корак представља сједињење (нпр. уградња ојачивача у матрицу), а други је обликовање. У ту сврху развијене су многе методе од којих су неке прилично софистициране, док се нпр. метални композити с дисконтинуираним влакнима обликују уобичајеним поступцима као што су ковање, ваљање и екструдирање.

За специфичне ваздухопловне примене посебно су развијени метални композити с алуминијумском матрицом додатно ојачаном честицама претежно неметалних материјала. Тако се на пример алуминијумска легура ознаке 6061 ојачава честицама силицијум карбида чиме се постиже знатно већа крутост ($E=230000 \text{ N/mm}^2$) и затезна чврстоћа ($R_m=1480 \text{ N/mm}^2$) уз само незнатно већу густину ($\rho=2930 \text{ kg/m}^3$) у односу на класичну неојачану легуру. За потребе ваздухопловства ова легура се може ојачати и влакнима бора (летелица "Space Shuttle Orbiter") чиме се такође постиже велика крутост и чврстоћа ($E=207000 \text{ N/mm}^2$, $R_m=1515 \text{ N/mm}^2$).

Композити са металном матрицом се могу поделити на:

- композите са алуминијумском матрицом
 - највећи удео на тржишту,
 - удео ојачања у матрици и до 70 % - честице, вискери, кратка влакна, континуирана влакна или нешто дебље нити,
 - значајно се повећава E до чак 240 GPa, чврстоћа, крутост, отпорност на трошење, снижује се топлотна растезљивост и до 70 %,
 - честице: оксиди, карбиди или бориди - Al_2O_3 , SiC (најчешће) или TiB_2 .
- композите са магнезијумовом матрицом
 - Mg - мала густина (око 1700 kg/m^3).
 - Ојачање C-влакнима даје:
 - вишу крутост,
 - вишу чврстоћу,
 - малу топлотну растегљивост,
 - лошу отпорност на корозију.
 - Mg-легура с честицама SiC :
 - мала густина,
 - мала топлотна растегљивост,
 - висок модул еластичности.

- композите са титанијумовом матрицом
 - изузетно висока механичка својства, врло добра отпорност при високим температурама и отпорност на корозију,
 - најчешће SiC влакна - у једном смеру.
- композите са бакарном матрицом
 - висока топлотна проводљивост ($> 500 \text{ W/mK}$),
 - мала топлотни истезање ($4\text{-}7\cdot 10^{-6} / \text{K}$),
 - Cu-матрица с C-влакнима или W-влакнима (за високе температуре),
 - инфилтрација текућег Cu између C-влакана, металургија праха и превлачење C-влакана с Cu.
- композите са матрицом од суперлегура
 - суперлегура 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°C).

3.2.2. 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 чести композити стакленог и угљеничног ојачања садрже крута и чврста, али крта влакна уграђена у полимерну матрицу, која није углавном ни крута ни чврста.

Кад је реч о полимерима, они се деле у два велика групе: дуромери и пластомери.

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 поновном загревању размекшавају те их је могуће поновно обликовати. Ово омогућује поправљање делова који су израђени од ових композита, као и њихово дјелимично рециклирање. Надаље, код пластомера је могућа одређена кристалинност, док су дуromoмери искључиво аморфни. Кристалинност је узрокована усмереношћу ланаца. Они делови полимера (или они полимери) који су кристалинни имају већу густину, али и боља механичка својства и отпорност утицају растварача (што је узрокована 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 коришћене **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. Надаље, 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 дио структуре матрице. Након мешања епоксида и очвршћивача, под деловањем топлоте долази до стврдњавања што се догађа неколико сати. Коначна својства епоксидне матрице показују изразиту кртост, што доводи до знатне осетљивости обзиром на појаву пукотина. Да би се побољшала ова својства, као и отпорност влази 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 **адитивни полиимиди**. Међу њима су најпознатији **бизмалеимиди (БМИ)** који поседују добре производне карактеристике но главни недостатак им је повишена кртост која се може смањити додавањем одговарајућих спојева (нпр. полисулфон, полиетеримид и др). Друге врсте ових спојева јесу **ПМР-15 полиимиди** са ГТТ од готово 300 °С. **Цианати** су такође дуромери који су погодни за примену на високим температурама који имају ГТТ око 290 °С. Одликују их добре карактеристике при примени у врућим и влажним условима (нешто слабија од епоксидне смоле) и висока тврдоћа. Врло су често коришћени и **незасићени полиестери**, најчешће у комбинацији са стакленим влакнима. Представник ових полимера су **винил естери** који су врло популарни због своје цене, отпорности на влагу, брзине и једноставности у изради композита.

Епоксидне смоле спадају у скупину аморфних полимера које карактеризира појава гумене (гел) фазе на вишим те стакласте фазе на нижим температурама. Епоксиди који полимеризирају на собној температури погодни су за кориштење на температурама до 50 °С док се зависно од типа очвршћивача остале врсте епоксида обрађују на температурама између 120 и 180 °С. 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 се ради 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 ломног издужења уз смањење модула еластичности, побољшање отпорности ширењу пукотина, промјена густоће и др. Њихов је основни недостатак инхерентна кртост попраћена великом чврстоћом што се често побољшава додавањем пластомера. Главне предности епоксида јесу могућност подешавања својстава према постављеним захтевима, могућност контроле жилавости те лака и сигурна производљивост 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 неким органским спојевима (нпр. органским киселинама и фенолима) те релативно ниска највиша температура примене.

Полиестерске смоле такође припадају дуромерима, а производе се егзотермним хемијским реакцијама при којим се незасићени полиестери мешају с релативно малом количином иницијализатора (катализатора). Као код епоксида, и овде материјал при полимеризацији прелази из текуће, преко гел до круте фазе. Главне предности ових материјала јесу мала почетна вискозност, мала цена почетних сировина, једноставна производња те изврсна отпорност атмосферским утицајима. С друге стране, полимеризација је врло егзотермна с високим скупљањем чиме се у процесу производње уносе значајна заостала напрезања, кртост те слаба хемијска отпорност неким спојевима (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 оплакивање влакана. ГТТ им је измеђ у 180 - 320 °C док је максимална температура при којој се могу користити до 150 °C. Ови су материјали изворно крти 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 њихово кориштење на температурама изнад 125 °C, посебно у условима повећане влаге. Основни су недостатак знатно виши трошкови производње у односу на епоксиде. Данас БМИ композити у ваздухопловним конструкцијама све чешће замјењују композите са угљеничном матрицом.

Полиимидне смоле имају предност врло високе температуре примене коју нема ни једна друга врста полимера, будући да им је ГТТ између 200-400 °C. Надаље, зависно од технологији 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 кориштење препрега или РТМ (RTM - Resin Transfer Molding). У ваздухопловним конструкцијама користе се за кућишта млазних мотора или за конструктивне 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, висока квалитета произведених компоненти, отпорност већини хемикалија, док је недостатак цена и сложеност производње.

Цианатне смоле полимеризирају помоћу катализатора релативно брзо при температурама 170-250 °C и с 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 кориштење у ваздухопловним конструкцијама. Ови материјали се могу мешати с епоксидима или другим дуромерима како би се добила побољшана својства.

Пластомери су најшире класификовани као аморфни и кристалинични, мада сви испољавају кристалиничност у већој или мањој мери. Надаље, 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 будући 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 с изузетком концентрисане сумпорне киселине. Основни је недостатак 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, те температуру примене од епоксида или бизмалеимида. Надаље, 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 %) с одличном топлотном стабилношћу те хемијском и ватро отпорношћу 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 упоређењу с већином кристаличних полимера. Висока ГТТ омогућава коришћење на температурама до 200 °C. Хемијски је врло отпоран на велик број хемикалија и на атмосферске утицаје. Примену му ограничава врло велика вискозност у растопљеном стању.

3.2.3. Керамички композити ЦМЦ

Керамички композити 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 карбид (SiC) и силицијум нитрид (Si_3N_4) ако се ради о вискерима.

Керамички композити се према саставу могу поделити на:

- **неоксидну керамику:** SiC , Si_3N_4 , BC , AlN итд. Нешто боља механичка својства,
- **оксидну керамика:** Al_2O_3 , SiO_2 , мулит ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$), Ва-, Li- и Са-алуминосликати. Нешто боља топлотна у хемијска стабилност.

Керамика је опште позната као материјал отпоран пузању који задржава добру механичку отпорност при високим температурама, док је њен основни недостатак склоност кртом лому због изразито ниске ломне 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 ломна 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 успоравање 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 успоравање се заснива на заобљавању врха пукотине, премошћавању пукотине, апсорбовању енергије током затезања при чему се вискери одвајају од матрице или долази до прерасподеле напрезања у ивичним подручјима пукотине. Предност вискерима ојачаних керамика 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 керамичке матрице производе се поступцима врућег пресовања (НР), врућег изостатичког пресовања (НІР) и синтеровања.

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

3.3. Биокомпозити

Биокомпозити су композитни материјали сачињени од:

- природних влакана (биљног или животињског порекла) и биолошки неразградљивих полимера насталих деривацијама нафте (дуромера - нпр. епоксидна смола, фенолна смола и пластомера: ПЕ, ПП, ПВЦ, ПС),
- синтетичких (вештачких) влакана и биополимера (насталих прерадом биљака),
- од природних влакана и биополимера које су уједно и најеколошкији 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 (од 25 до 50 % у односу на стаклена) један је од важнијих, ако не и главни разлог преласка на композите пуњене тим влакнима. Биљна влакна драстично смањују масу уз задржавање механичких својстава композита. Најбољи пример је панел за врата који уз иста својства грађен од композита од биљних влакана има масу од 5 kg, док је

онај пуњен стакленим влакнима масе 9 kg. Због ниже густине, која никад није виша од $1,5 \text{ g/cm}^3$, компоненте не само да су лакше него и аутомобили грађени од њих троше мање горива. 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 топлотни изолатори. Биљна влакна лакше се режу и слабије су абразивна према опреми за прераду од стаклених влакана. За разлику од стаклених влакана не утичу негативно на здравље корисника (дерматолошки и респираторни проблеми). Будући да су пољопривредни производи, до биљних влакана се лако долази и доступна су у целом свету. Производња није у сукобу с одрживим развојем и захтева мало енергије, око четири пута мање него за исту масу стаклених влакана. Лако се компостирају или уништавају спаљивањем па су CO_2 неутралне, тј. не ослобађају вишак CO_2 у атмосферу.

ПРЕДНОСТИ:

- обновљиви извори,
- лака доступност,
- ниска цена и мали удео утроска енергије током производње,
- мала густина (специфична тежина) осигурава високу специфичну чврстоћу и крутост у поређењу са стакленим влакнима,
- сигурније за руковање и производњу у односу на синтетичка влакна,
- уштеде због мањег трошења опреме јер су природна влакна не абразивна у односу на синтетичка влакна,
- висока електрична непроводљивост,
- добра звучна изолација,
- не настаје CO_2 (биљке стварају једино угљеничне спојеве приликом разградње или компостирања).

НЕДОСТАЦИ:

- тешко распршљиви у матрици,
- природна влакна су хигроскопна - упијају влагу, што има за последицу стварање пора, слабљење веза а тиме и лошијих механичких својстава композита,
- влакна почињу деградацију у распону до 90 до 200 °C, па су температура обраде и избор материјала матрице ограничени,
- осетљиви су на труљење / деградације из окружења (микроорганизме, гљивице, итд.),
- димензије влакана и механичка својства варирају од биљке до биљке,
- садња биљака за израду ојачивача смањује земљишта за садњу прехрамбених сорти.

Зашто желимо користити природна влакна:

- Предности су веће од недостатака,
- 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 конструкцијским апликацијама,
- Природна влакна су обновљива и рециклирајућа.

4. Особине композитних материјала

Могући однос матрица-ојачивач даје могућност да се композитни материјали прикажу и на начин дат у табели 4.1.

Табела 4.1. Однос материјала матрице и ојачивача

		МАТРИЦА			
		метална	полимерна	керамичка	угљенична
ОЈАЧИВАЧ	метални	метално-метални	полимерно-метални	керамичко-метални	угљенично-метални
	полимерни	метално-полимерни	полимерно-полимерни	керамичко-полимерни	угљенично-полимерни
	керамички	метално-керамички	полимерно-керамички	керамичко-керамички	угљенично-керамички
	угљенички	метално-угљенични	полимерно-угљенични	керамичко-угљенични	угљенично-угљенични

Композит општи назив добија према имену матрице. У табели 4.1. се види да постоји 16 могућих подгрупа, али је због различитих особина и различитог понашања група материјала овај број нешто мањи.

Уопштено посматрано особине композита зависе од:

- својстава конституената тј. матрице и ојачивача,
- величине и расподеле конституената,
- запреминског удела конституената,
- облика конституената,
- природи и јачини веза између конституената.



Слика 4.1. Претежне особине група композитних материјала

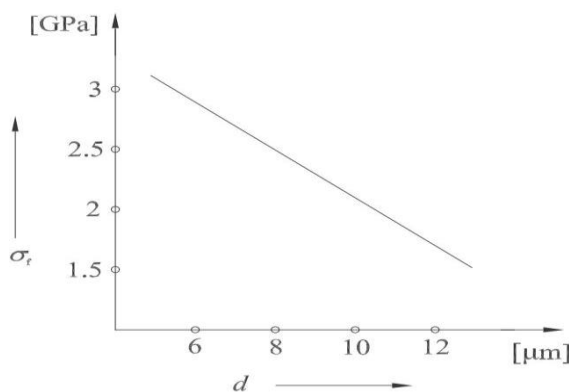
Табела 4.2. Упоредна својства композитних материјала

Својство	Композити		
	метални	полимерни	керамички
Густина [g/cm^3]	2-16	1-2	2-17
Температура топљења [$^{\circ}\text{C}$]	200-3500	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 [МПа]	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

Табела 4.3. Карактеристике неких композитних материјала

материјал	матрица	титан	угљеник	полиестер	епоксид		
	ојачивач	TiC честице	угљенична vlakна	стаклено ткање	стаклено ткање	арамидно ткање	угљеничн о ткање
Састав	w _i %	20 TiC(p)	50 C(Vf)	фабричко ткање	ткање (kil)	ткање (kil)	ткање (kil)
ρ	g/cm ³	4.52-4.58	1.68-1.72	1,6-2,0	1,75-1,97	1,38	1,54-1,61
R _m	N/mm ²	950-1040	220-250	175-345	31,9-35,1	92-106	470-668
R _{m,t}	N/mm ²	960-1050	14-23	210-350	319-351	129-152	450-649
E	kN/mm ²	140-160	90-100	14-31	66,3-69,7	24-31	44-48
ν	-	0,33-0,35	0,31-0,33	0,30-0,35	0,31-0,32	0,33-0,35	0,33-0,34
R _e	N/mm ²	940-1040	14-23	166-276	207-304	129-152	450-649
A	%	0,3-0,31	0	1-2	0,85-0,95	0,37-0,42	0,84-0,93
K _{IC}	N/mm ^{3/2}	580-890	180-200	340-660	190-950	190-1400	190-2800
HV		240-270	67-74	50-83	11-22	11-22	11-22
R _{d,is}	N/mm ²	26,9-31,3	15-17	83-138	41-91	71-99	247-477
t _{max}	°C	380-430	2000-2100	170-190	140-220	140-220	140-220
t _{min}	°C	-273	-273	-120 -70	-120 -70	-120 -70	-120 -70
c	J/(kg K)	585-590	754-758	1150-1210	1020-1120	510-690	950-1090
λ	W/(m K)	5,5-6,0	10-70	0,65-0,68	0,42-0,51	0,19-0,26	1,1-2,2
α	μm/(m K)	7,7-8,4	0,6-8,2	27-54	8,6-33	9,4-13	5,5-29
E _k	MV/m	-	10-20	14-20	12-20	12-20	-
ε ₀	μΩ cm	180-190	1100-2700	10 ¹⁸ -10 ¹⁹	2·10 ²¹ - 2·10 ²²	3·10 ¹⁹ - 2·10 ²¹	2·10 ⁵ - 7·10 ⁵
k _{reciklic}		0	0	0,015	0,015	0,015	0,015
цена	РСД	6000-8500	600-850	580-660	700-1560	9100-9900	4700-5500
ОТПОРНОСТ на	хабање	Добра	Добра	Средња	Средња	Средња	Средња
	оксидацију (500°C)	Врло добра	Слаба	Врло слаба	Врло слаба	Врло слаба	Врло слаба
	паљење	Врло добра	Средња	Слаба	Добра	Добра	Добра
	UV зрачење	Врло добра	Врло добра	Врло добра	Добра	Добра	Добра
	слатку воду	Врло добра	Врло добра	Врло добра	Врло добра	Врло добра	Врло добра
	морску воду	Врло добра	Врло добра	Врло добра	Врло добра	Добра	Врло добра
	јаке киселине	Добра	Добра	Средња	Средња	Средња	Средња
	јаке базе	Добра	Слаба	Средња	Врло добра	Врло добра	Врло добра
	слабе киселине	Врло добра	Врло добра	Врло добра	Врло добра	Врло добра	Врло добра
	слабе базе	Врло добра	Врло добра	Средња	Врло добра	Врло добра	Врло добра
	органске разређиваче	Врло добра	Врло добра	Средња	Добра	Добра	Добра

Висока механичка својства влакана резултат су снажних међуатомских сила које владају у материјалима ниског атомског броја и мале густине (нпр. C, B, Al, Si). Влакна могу бити направљена или само од тих елемената, затим од њихових међусобних спојева, или спојева с кисеоником и азотом. Код ових материјала није изражено пластично течење, као нпр. код метала, већ се лом догађа услед интегралног ефекта деловања микроскопских пукотина, чији се број смањује што су мање димензије влакна (попречни пресек у односу на дужину, види слику 4.2.).

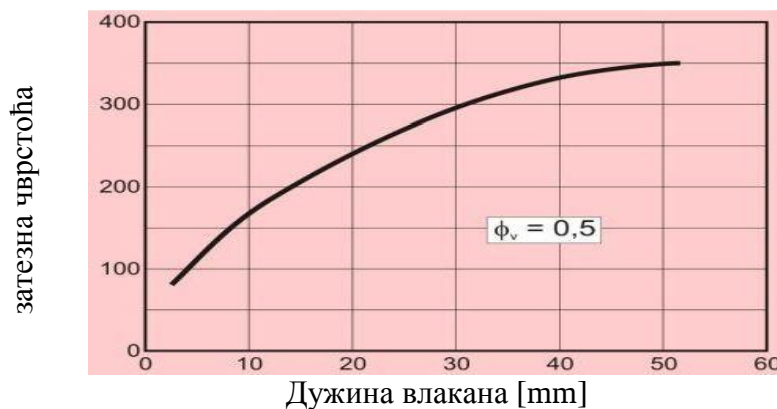


Слика 4.2. Утицај пречника влакна d на чврстоћу σ_r

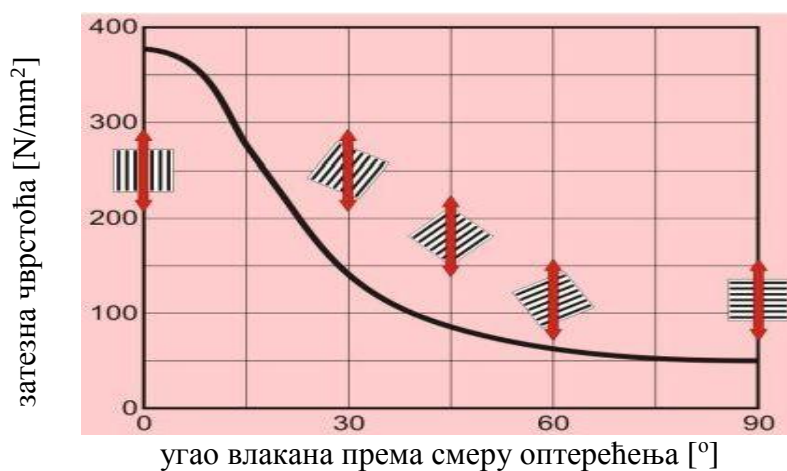
Материјал у влакнастој форми стога, има врло малу запремину по метру дужине, те је вероватноћа појаве пукотине обрнуто пропорционална запремини материјала (према Weibull-овој расподели). Са друге стране, код оваквог је материјала знатно више изражено одступање својстава од референтних вредности. Ова неуједначеност механичких својстава представља велик проблем при прорачуну и изради композитних конструкција. Број микроскопских пукотина може бити знатно смањен технологијом израде влакна (где је од посебне важности чистоћа сировине од које је влакно направљено) или заштитном пресвлаком око влакна. Нпр. брзина таложења молекула и брзина хлађења имају знатан утицај на структуру влакна, при чему врло велике брзине хлађења дају врло фину молекуларну структуру која се не може постићи код материјала у невлакнастој форми.

Надаље, 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 с влакнима у великој мери зависе и од дужине влакана и о углу правца под којим делује оптерећење у односу на правац влакана. На слици 4.3. дат је пример код епоксидне матрице с Е стакленим влакнима.

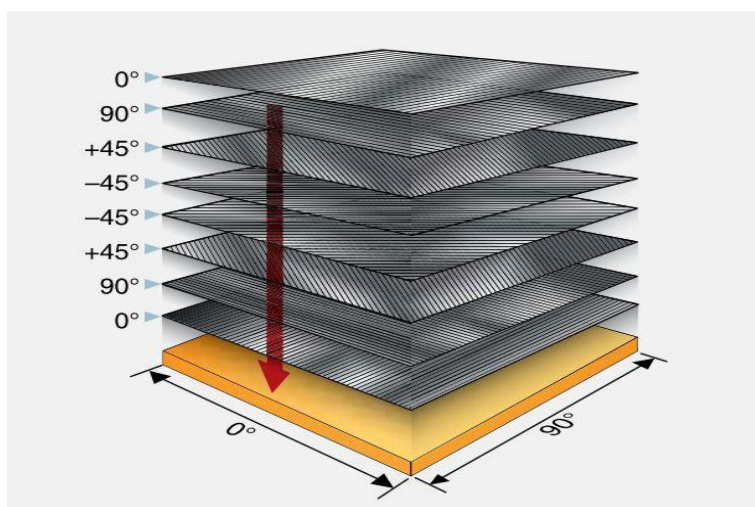


Слика 4.3. Однос затезне чврстоће и дужине влакана (епоксидна матрица са 50% Е стаклених влакана)



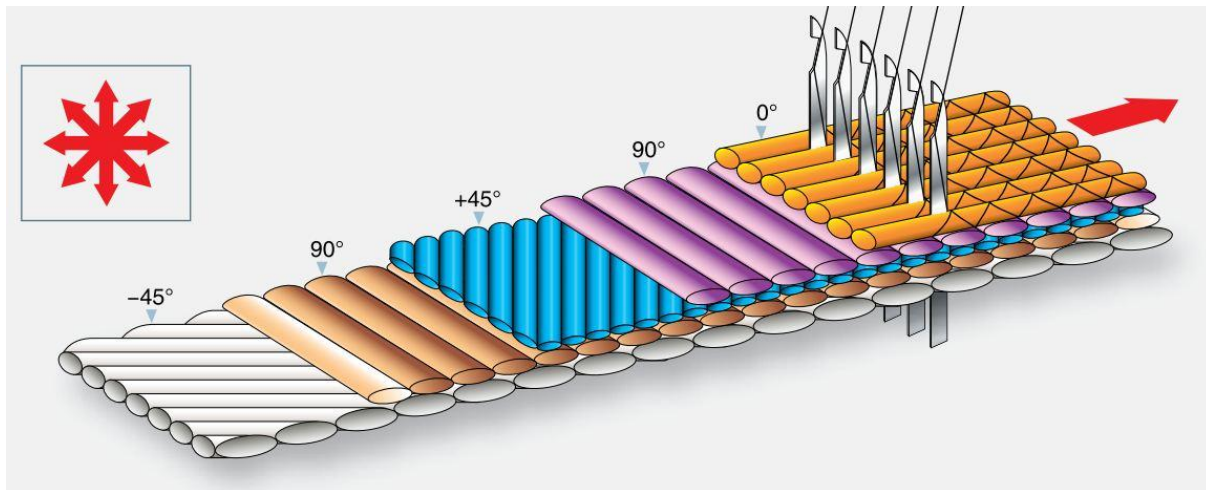
Слика 4.4. Однос затезне чврстоће и угла влакана према смеру оптерећења (епоксидна матрица с 50% Е стаклених влакана)

Како би се избегла појава различитости особина композитних материјала (нпр. промена затезне чврстоће) у различитим угловима оптерећења (слика 4.4) врши се стварање тзв „квази изотропског материјала“ на тај начин што се слојеви усмереног ојачивача слажу под различитим угловима (слика 4.5).



Слика 4.5. Квази 2D изотропски ламинатни (слојевити) материјал

Исти ефекат квази изотропског материјала се код разнослојних материјала може постићи (без лепљења и ткања) на тај начин што се различито усмерени разнородни слојеви повежу прошивањем посебним нитима (слика 4.6) и на тај начин изврши „уједначавање“ жељене особине.



Слика 4.6. Квази 2D изотропски разнослојни материјал

4.1. Метални композити ММЦ

Означавање:

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: суперлегури, легуре алуминијума, магнезијума, титана и бакра

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

Предности:

- врло висока чврстоћа и крутост уз врло малу густину,
- висока топлотна и електрична проводљивост и ниска топлотна растегљивост,
- врло добра отпорност на хабање,
- врло добра својства на високим температурама.

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.

Табела 4.4. Карактеристике неких ММЦ композиата

Влакно	Матрица	Запремински удео влакна	ρ	E	R_m
		%	kg/m^3	kN/mm^2	N/mm^2
С влакно	Al-легура 6061	41	2440	320	620
Влакно бора		48	-	207	1515
SiC		50	2930	230	1480
Al ₂ O ₃	Al-легура 380.0	24	-	120	340
С влакно	Mg-легура AZ31	38	1830	300	510
“Borsic”	Титан	45	3680	220	1270

4.2. Полимерни композити ПМЦ

Полимерни композити ојачани стакленим влакнима - 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,
- скуп поступак добијања из ПАН-а,
- пречник влакана : 4-10 μm ,
- премазан са епоксидном смолом за осигурано лепљење са матрицомч.

Употреба:

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

Полимерни композити ојачани арамидним влакнима – AFRP

Арамидна влакна (Kevlar, Nomex):

- 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 одјећа (панцирни прслуци),
- спортски реквизити, итд.

4.3. 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.

Табела 4.5. Карактеристика ЦМЦ композита: SiC матрица са SiC континуалним влакнима

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 1/K	2,7
Топлотна истегљивост	W/(m K)	1,32

4.4. Угљеник-угљеник композити

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

Изразита својства ове групе композита су:

- пре свега висок модул еластичности и висока затезна чврстоћа (чак и на температурама изнад 2000 °C),
- отпорност пузању,
- релативно висока ломна жилавост (у широком распону: 20-100 Nmm^{3/2}),
- мала топлотна растегљивост,
- висока топлотна проводљивост (250-350 W/mK),
- мала осетљивост према топлотном шоку.

Њихов основни недостатак је склоност ка оксидацији при високим температурама (> 450 °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).

Примењују се у ракетним моторима и конструкцијама савремених војних авиона.

4.5. 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 врло различита. Тако, на пример, влакна могу бити усмерена у једном смеру или оријентисана у различитим смеровима, ламинати се могу слагати из различитих слојева 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 4.6. наведени су неки примери хибридних композита и њихова својства.

Табела 4.6. Својства хибридних композита

Композит 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.
Композит са арамидним и стакленим влакнима	• мала густина, добра жилавост и чврстоћа на затезање од арамида; • затезна и чврстоћа на затезање од стакла; • ниска цена.
Композит са угљеничним и стакленим влакнима	• добра притисна и чврстоћа на затезање, крутост и ниска густина од угљеничних влакана; • ниска цена.

5. Добијање композитних материјала

5.1. 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.

5.1.1. Поступци у чврстом стању (Solid State Processing)

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 крхких 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 ако може довести до хемијске реакције влакана. Недостатак ових поступка је што захтевају чисте површине пре покушаја самог спајања. Неопходно је претходно чишћење самог материјала и одвијање поступка у вакууму.

5.1.2. Високотемпературна синтеза (SPS Self-Propagating Synthesis)

Високотемпературна 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.

5.1.3. Металургија праха (PM Powder Metallurgy)

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 μm , док је величина праха легуре матрице (алуминијум или магнезијум) од 20-40 μm . 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 оксидира, 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 смесе 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.

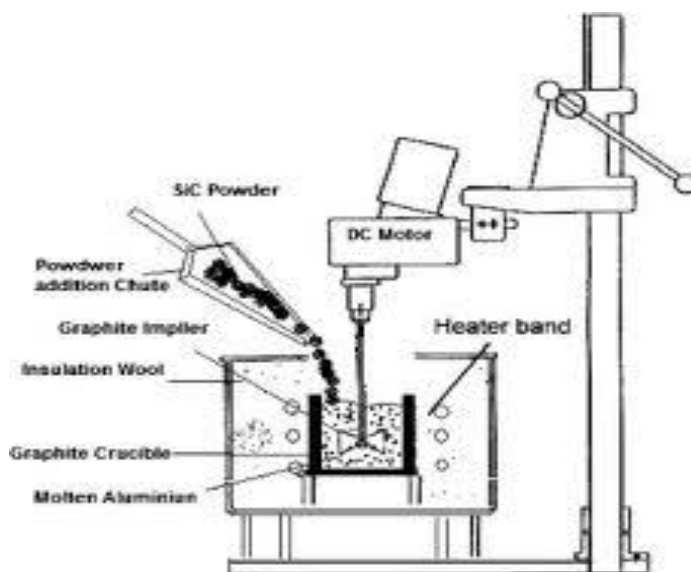
5.1.4. Поступци у течном стању (Liquid Processing)

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 спојем титан диборита у случају алуминијумских ММЦ-а.

5.1.5. Ливење у калуп

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.

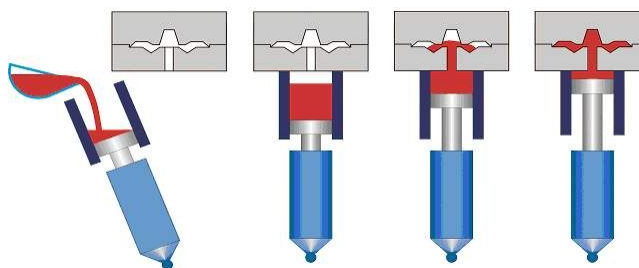
5.1.6. Ливење мешањем (Stir Casting)



Слика 5.1. Ливење мешањем (Stir Casting)

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

5.1.7. Ливење гњечењем (Squeeze Casting)



Слика 5.2. Ливење гњечењем (Squeeze Casting)

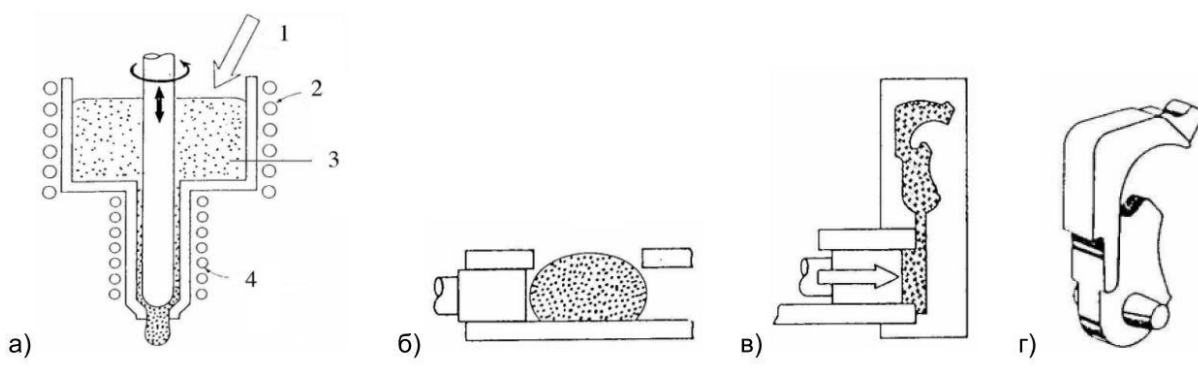
Ливење гњечењем подразумева утискивање порозне керамичке форме у прегрејан калуп, који ће се касније испунити течним металом. Помоћу притиска течни метал улази у керамичку форму при чему настаје чврст композит. Током овог поступка долази до истовременог очвршћавања основе уз остваривање чврсте граничне 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 (нема даље обраде) и нуди способност селективног ојачавања елемената.

5.1.8. Ливење у получврстом стању (Rheocasting, Compocasting)

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.

5.1.8.1. Реокастинг поступак (Rheocasting)

Код реокастинг поступка дендритни полуочврсли растоп неке легуре трансформише се у недендритну двофазну (чврсто-течно) смешу. Овој смеси могуће је мењати привидни вискозитет. Наведена појава омогућава изливање смеси у одређену форму под притиском (ради добијања готових одливка) или гравитационо (за добијање недендритних ингота које је могуће даље прерађивати поступцима пластичне прераде, као што су: екструзија, ковање и ваљање). Шематски приказ реокастинг поступка дат је на слици 5.3.



Слика 5.3. Шематски приказ реокастинг поступка

а) континуирани реокастер: 1-улаз растоп, 2-грејач горње коморе, 3-растоп, 4-грејач доње коморе, б) комора уређаја за ливење под притиском, в) убризгавање полуочврстог растоп у алат, г) одливак - готов комад

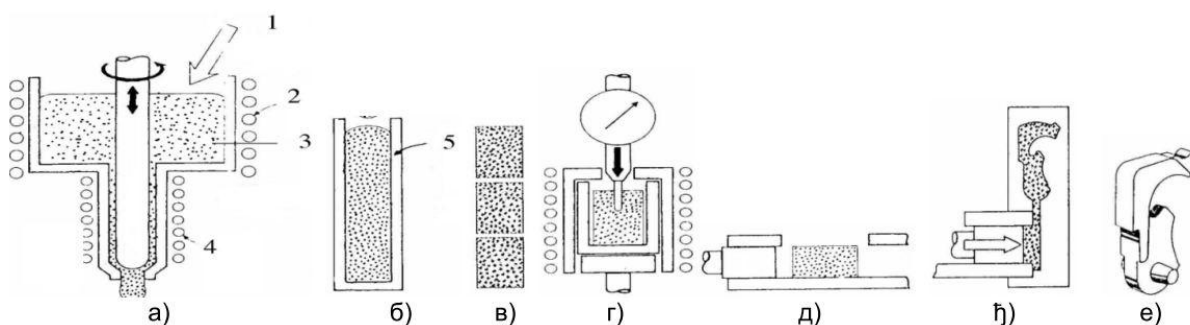
Припремљен растоп се улива у уређај који се назива „реокастер“, у овом случају континуирани реокастер, (слика 5.3). уређај се састоји од две коморе. У првој (која има сопствено грејање) прихвата се растоп и одржава на некој температури изнад ликвидус температуре. У другој (доњој) комори образује се получврсти растоп. Доња комора је снабдевена системом за хлађење тако да се регулацијом температуре може регулисати однос чврсто-течно.

Мешач облика ваљка пролази кроз обе коморе. Избором одговарајуће брзине мешања могуће је добити жељени привидни вискозитет полуочврстог растопа, односно потребну течљивост. Двофазна смеша се затим излива у комору мешавине за ливење под притиском (слика 5.3. б). Даљи поступак сличан је класичном ливењу под притиском: активира се клип и полуочврсли растоп се убризгава у алат (слика 5.3. в). Процес се завршава добијањем готовог одливка (слика 5.3. г).

Друга варијанта реокастинг поступка предвиђена за добијање полупроизвода названа „тиксакастинг поступак“ приказан је на слици 5.4. Полуочврсли растоп се

реолошки обрађује у реокастеру (слика 5.4. а) после чега се улива у калуп (слика 5.4. б) и тако се добијају инготи. С обзиром да је структура добијених ингота недендритна, овако добијени инготи се често називају „тиксо-инготи“.

Инготи већих димензија могу се скратити на више мањих (слика 5.4. г) и употребити на више начина. У варијанти приказаној на слици 5.4. део материјала исечен је из великог ингота и загреван у посебној пећи. По достизању планиране температуре шаржиран је у комору машине за ливење под притиском. Добијени тиксо-инготи могу се (скраћени или не) примењивати за процесе пластичне прераде: ковање, ваљање, и др.



Слика 5.4. Шематски приказ тиксокастинг поступка

а) континуирани реокастер: 1-улаз растоп, 2-грејач горње коморе, 3-растоп, 4-грејач доње коморе, 5-калуп, б) тиксо-одливак (ингот), в) тиксо-ингот исечен на мање комаде, г) додатни уређај за загревање дела тиксо-ингота, д) комора уређаја за ливење под притиском, ђ) убризгавање полуочврслог растоп у алат, е) одливак

Реокастинг поступак је веома погодан за добијање композита са металном основом, уз додатак честица или кратких влакана материјала као што су Al_2O_3 , SiC и други. Постоји могућност одржавања оптималног вискозитета полуочврслог растоп током мешања уз истовремено додавање честица ојачивача и њихово задржавање у маси основе.

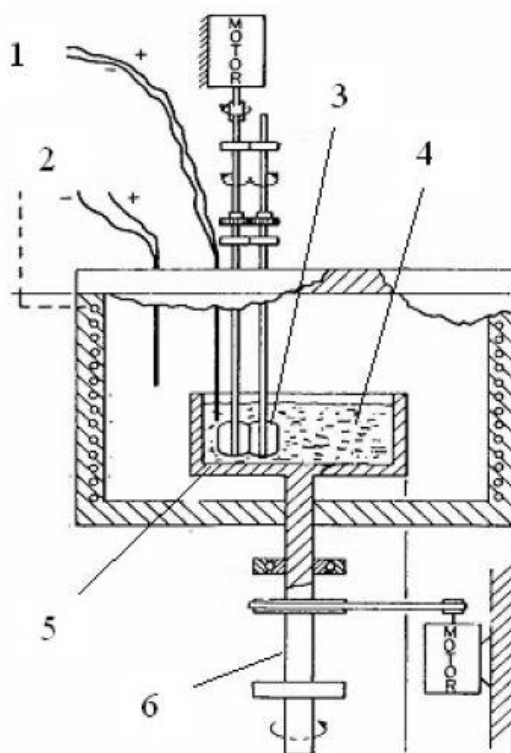
5.1.8.2. Компокастинг поступак (Compocasting)

Компокастинг је један од низа поступака за добијање композитних материјала у оквиру тзв. „ингот металургије“. Карактеристичан је по томе што се жељени ојачивач инфилтрира у металну основу која је у полуочврслост стању (у температурном интервалу између ликвидус и солидус температуре), уз мешање. Компокастинг поступак се користи за добијање композита са металном основом ојачаном честицама или кратким влакнима материјала као што су: Al_2O_3 , SiC , графит и други.

Предност овог поступка је у томе што се за његово извођење честице ојачивача не морају претходно припремити, тј могуће је добити композит са честицама које нису квашљиве у растопима метала. Даља прерада материјала добијених компокастинг поступком могућа је применом технологија као што су: ливење под притиском, пресовање, ваљање и ковање.

Ради извођења компокастинг поступка конструисани су посебни уређаји. Један такав уређај је приказан на слици 5.5. уређај се састоји од пећи за топљење, мешалице и лонца (у систему на слици: везаног за систем за обртање). Систем је снабдевен потребним бројем термопарова ради строге контроле температуре.

Компокастинг поступак успешно се користи за добијање композита на бази легуре ZA27 уз додатак Al_2O_3 и SiC честица.



Слика 5.5. Шематски приказ апаратуре коришћене за добијање композита на бази легуре алуминијума уз додатак честица ојачивача компокастинг поступком 1-контрола температуре полуочврслог растоп 2-контрола температуре коморе, 3-мешач, 4-полуочврсли растоп 5-посуда, 6-уређај за обртање посуде

Коректно контролисан компокастинг поступак могао би да буде широко прихваћен као комерцијалан начин за производњу композитних материјала, с обзиром да поседује значајне предности:

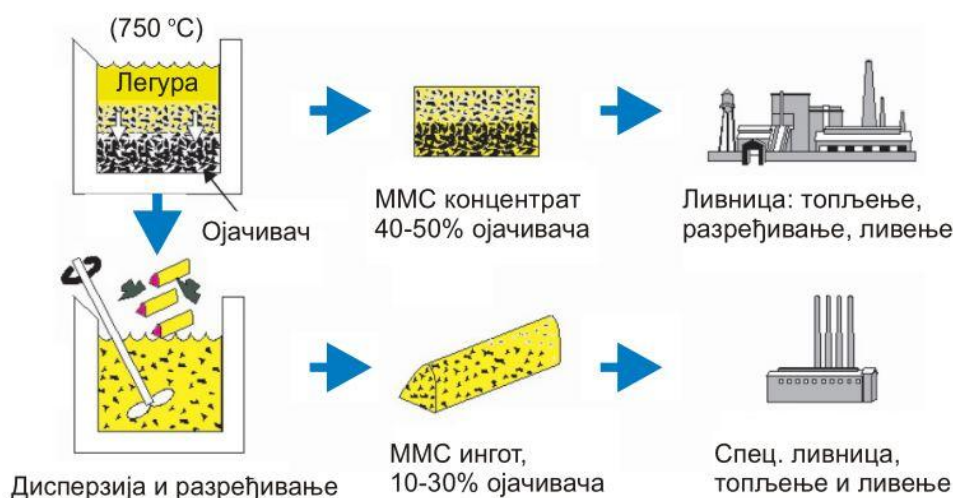
- нижа температура изливања полуочврслог растоп у алате (а самим тим и продужење времена њиховог трајања),
- уштеда у енергији и материјалу,
- велики избор могућих облика финалног производа,
- могуће је (уз одговарајућа техничка и процесна побољшања) у великој мери побољшати распоред честица ојачивача у основи а тиме и механичке особине композитних материјала,
- претходна припрема честица ојачивача није неопходна што поједностављује и појефтињује производњу.

5.1.9. Инфилтрација метала под ниским притиском (Pressureless Metal Infiltration)

Инфилтрација метала под ниским притиском је поступак у власништву фирме Ам Ленксајд (AM LANXIDE), 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 (Lanxide™). Овим поступком добијају се готови облици и својства композита који могу задовољити одговарајуће специфичне намене.

Новијим поступком (Primex Concencrate™) производи се материјал који се касније може претапати и користити у ливницама за производњу делова од алуминијумском ММЦ. Поступак обухвата инфилтрацију алуминијума у масу керамичких честица за ојачање, што је приказано на слици 5.6.



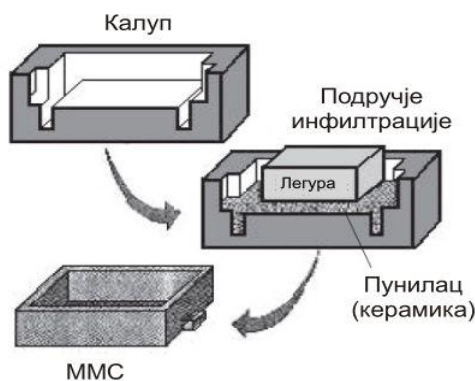
Слика 5.6. Шема производње ММЦ-а Primex инфилтрацијом

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

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

Значајна примена овог поступка је у производњи делова за електронске компоненте од SiCp/Al композита (слика 5.7.). Могу се испунити типични захтеви:

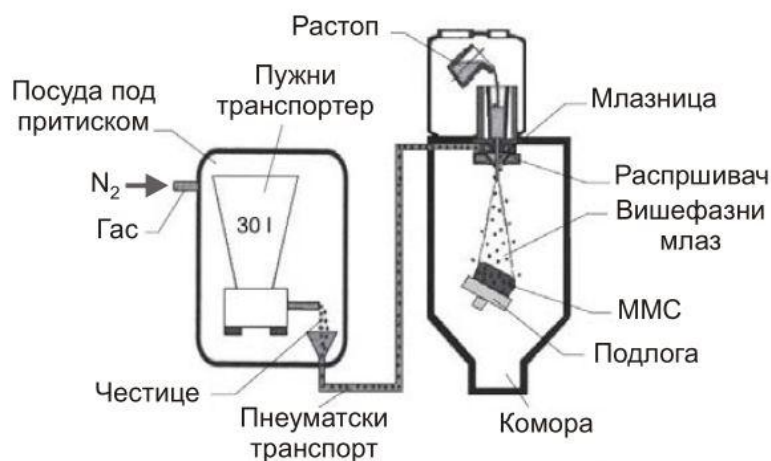
- мали коефицијент термичког ширења (да би се смањила механичка напрезања усмерена на електронски уређај током склапања и/или рада),
 - висока топлотна проводљивост ради смањења деформација,
 - мала густина за постизање минималне тежине производа,
 - смањење цене и повећање поузданости у односу на класичне методе израде електронских компоненти.



Слика 5.7. Шема производње електронског елемента инфилтрацијом

5.1.10. Спреј поступак (Spray Deposition)

Спреј поступак укључује атомизацију растопа (стварање засебних капљица), бризгање капљица растопљеног метала кроз дизне и скупљање и очвршћавање получврстух капљица на одговарајућој подлози. Шематски приказ овог поступка дат је на слици 5.8.



Слика 5.8. Шема спреј поступка

Оваквим поступком метална легура се топи индуктивним загревањем и излива у загрејану посуду. Растоп тече (кроз излаз на дну) 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:

1. директна производња претходних облика и
2. директно укључивање ојачивача у припадајућу матрицу.

ММС инготи се лију увођењем честица за очвршћавање (угљеник, Al_2O_3 , SiC) у метални млаз. Потребна је пажљива контрола услова дозирања да би се осигурала равномерна расподела честица.

5.1.11. Брзо очвршћавање (RSP Rapid-Solidification Processing)

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 (као што је магнезијум) 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 5.9.).



Слика 5.9. Поступак брзог очвршћавања

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:

1. Атомизација,
2. добијање трака (meltspun ribbon) и
3. добијање листића (meltspun flake).

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

5.1.12. Физичко таложење из гасовите фазе (PVD Physical Vapour Deposition)

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

5.2. Добијање композита са полимерном основом

Влакнима ојачани композити полимерне матрице могу се произвести различитим методама, од којих су најчешће: намотавање, ливење, РТМ поступак, пултудирање, напскавање, ручно полагање (ламинирање), вакуумско спајање.

5.2.1. Намотавање (Filament Winding)

Намотавање (engl. Filament Winding) је поступак при којем се континуалана влакна која служе као ојачивач намотавају на модел (обично цилиндрични) тако да обликују шупљи део. 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 (ободно) и
- поларно

од чега зависе и механичка својства, (слика 5.10.). 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 високи однос чврстоће и густине као и високи степен оријентисаности влакна.

Уобичајене намотаване конструкције су оплате (кућишта) ракетних мотора, резервоари и др.



Слика 5.10. Приказ намотавања филамената, прстенастог (ободног) и поларног намотавања

Предности:

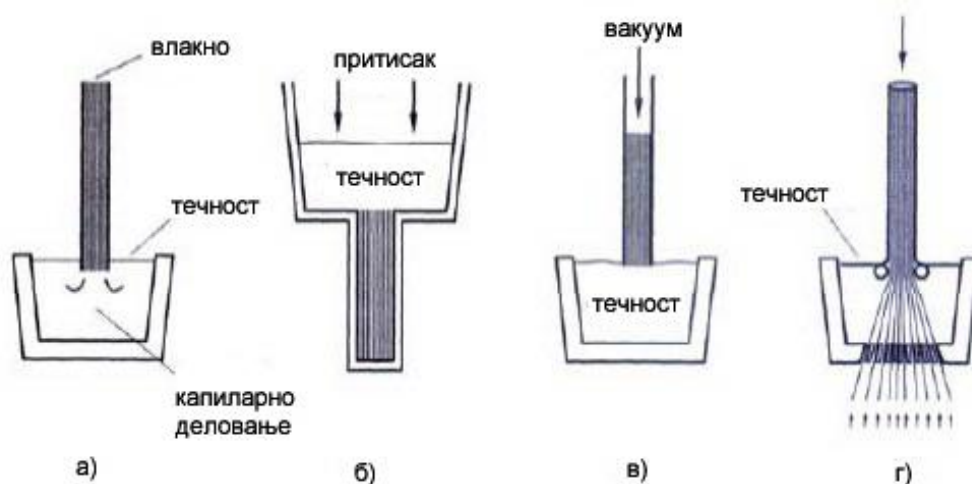
- врло брза и економична метода,
- контрола брзине намотавања,
- може се регулисати удио смоле на влакнима,
- трошкови су мањи због тога што се троше појединачна влакна, а не ткања,
- могу се добити одлична механичка својства композита ако се влакна послажу у смеру деловања оптерећења.

Недостаци:

- облици производа који се добивају су ограничени,
- смештај влакана на различите облике није увијек лак,
- немогућност уздужног полагања влакана,
- трошкови дела на коју се намотава могу бити високи у случају израде великих делова,
- спољашња површина производа није увијек естетски прихватљива,
- прилично недорађена спољашња површина делова искључиво конвексног облика.

5.2.2. Ливење

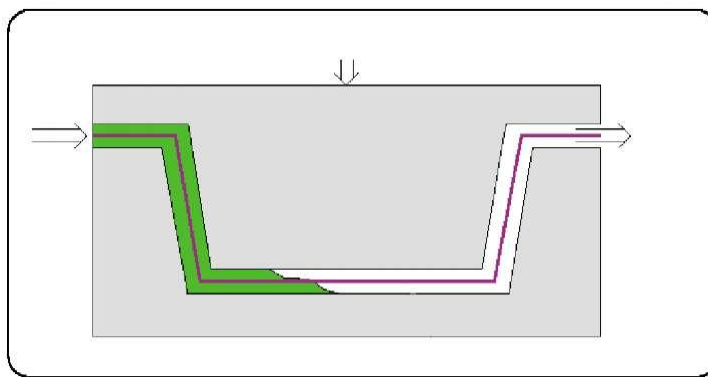
Полимерни композити могу се произвести различитим поступцима ливења. У зависности од начина како се течност полимерне смоле уноси међу влакна разликује се капиларно деловање, ливење под притиском, вакуумско инфилтрирање или континуално ливење, (слика 5.11.).



Слика 5.11. Производња композита ливењема) капиларно деловање, б) ливење под притиском, в) вакуумско инфилтрирање, г) континуално ливење

5.2.3. PTM поступак (RTM Resin Transfer Moulding)

На слици 5.12. приказан је начин ливења под притиском познат као PTM поступак (engl. Resin Transfer Moulding). Полимерна смола улива се под млазом у калупну шупљину и распоређује око ојачивача, а након полимеризације подстакнуте загревањем, калуп се уклања и добија се производ готовог облика.



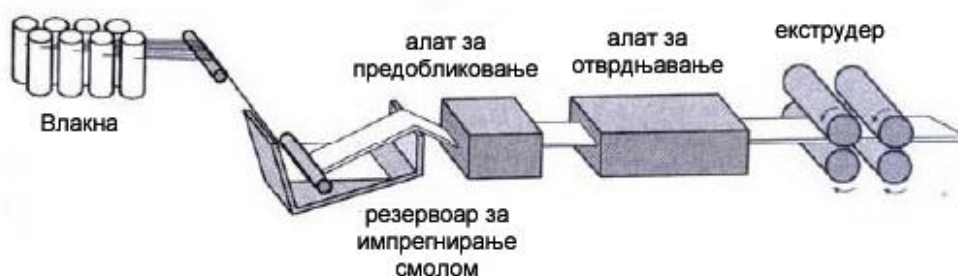
Слика 5.12. RTM поступак

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

Предности RTM 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.

5.2.4. Пултрудирање (вучење-екструзија)

Пултрудирање се примењује за производњу композитних производа константног попречног пресека (нпр. штапови, цеви, греде итд.). Овим поступком, шематски приказаним на слици 5.13, сноп континуалних влакана претходно импрегниран (натопљен) дурумерном 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.

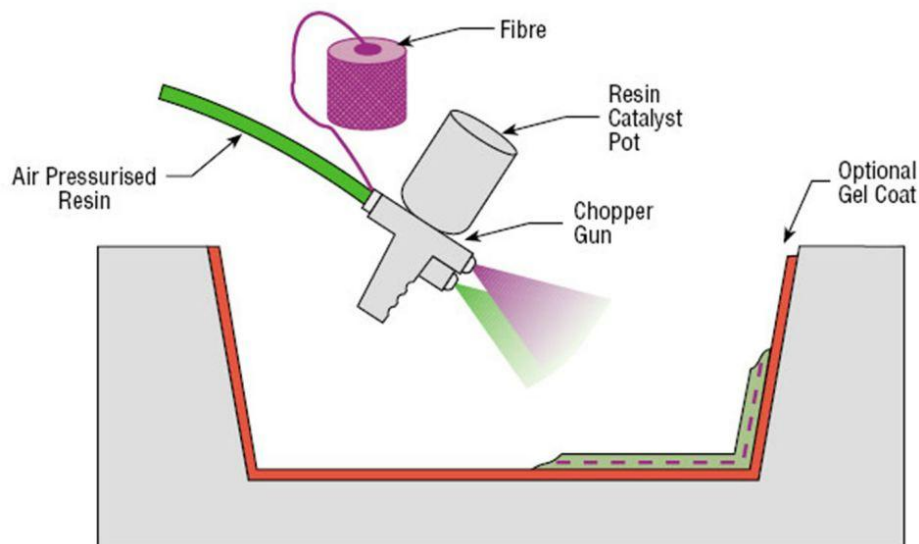


Слика 5.13. Приказ поступака пултрудирања

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

5.2.5. Напрскавање

Влакно (Fibre) улази у ручни пиштољ (Chopper Gun) у којем се сече на мање комадиће и додаје у струју текуће смоле. Таква се мешавина напрскава у калуп где се очвршћава у атмосферским условима (слика 5.14.). Као материјал матрице се углавном користе полиестери, док се за ојачање користи искључиво стаклени ровинг.



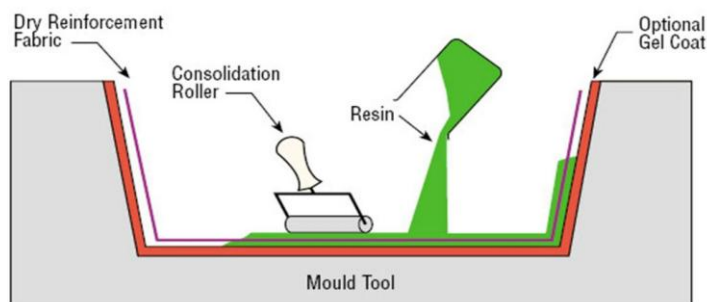
Слика 5.14. Приказ поступака напрскавања

Недостаци поступка су да производ садржи нешто већу количину смоле тако да имају већу масу, за ојачања 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.

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

5.2.5. Ручно полагање (аутоматско ламинирање)

Влакна повезана у ткања различитог облика стављају се у калуп (слика 5.15.). На њих се наноси смола која се импрегнира у ојачања помоћу ваљака. До очвршћавања долази при атмосферским условима. Матрице: сви материјали - полиестери, винил естери, епоксидне смоле, феноли итд. Сви типови влакана (проблеми се једино могу јавити у случају тежих арамидних влакана које је теже натопити ручно).



Слика 5.15. Приказ поступака напрскавања

Недостаци:

- квалитет поступка у великој мери зависи од способности радника. Тешко је произвести композите с малим уделом смоле без пукотина,
- смоле обично имају мању молекуларну масу, што значи да могу бити штетнији од производа с 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.

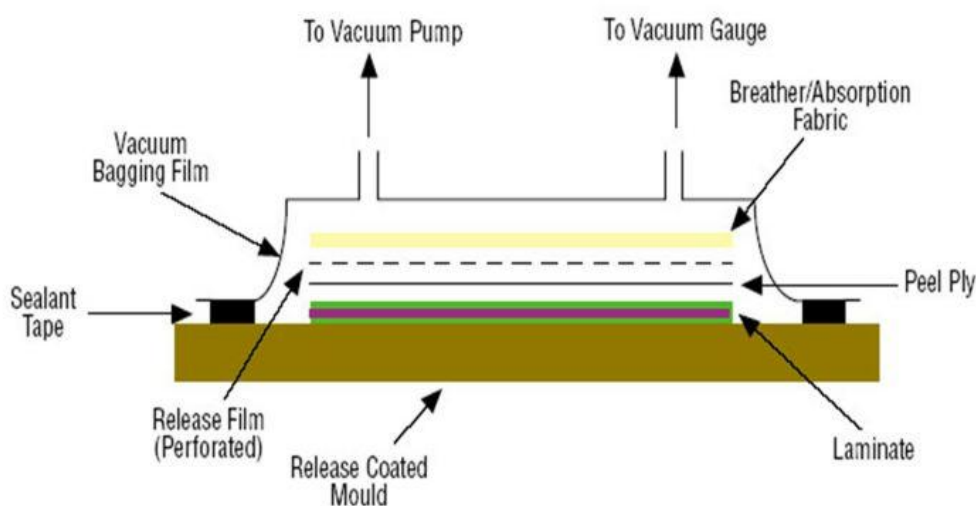
Карактеристике овог поступка

Максимална величина:	неограничено
Геометрија дела:	једноставна-сложена
Запремина:	мала-средња
Брзина израде:	мала
Квалитет површине:	добра-изврсна
Цена алата:	ниска
Цена опреме:	ниска

5.2.5. 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 (слика 5.16.).

Матрице: фенолне и епоксидне смоле, зато што код полиестера и винил естера Проблем може представљати повећана екстракција стирена. Могу се користити све врсте влакана.



Слика 5.16. Приказ поступка вакуумског спајања

Предности:

- производња композита с већим уделом влакана,
- мање пукотина у материјалу,
- боље је влажење влакана и проток смоле кроз ојачања због деловања повишеног притиска,

- вакуумски покривач смањује количину изветрелих штетних материја током очвршћавања.

Недостатак:

- процес је нешто скупљи и захтева прилично велику вештину оператера (врло битно код контроле мешања и удела смоле).

5.2.6. Други процеси убризгавања (SCRIMP, RIFT, VARM, ...)

Ткања се полажу у калуп а на њих се ставља површински покров и плетиво (слика 5.17.). Помоћу вакуум пумпе се уклања зрак, а затим следи убризгавање смоле. Плетиво олакшава проток смоле и влажење ојачања.

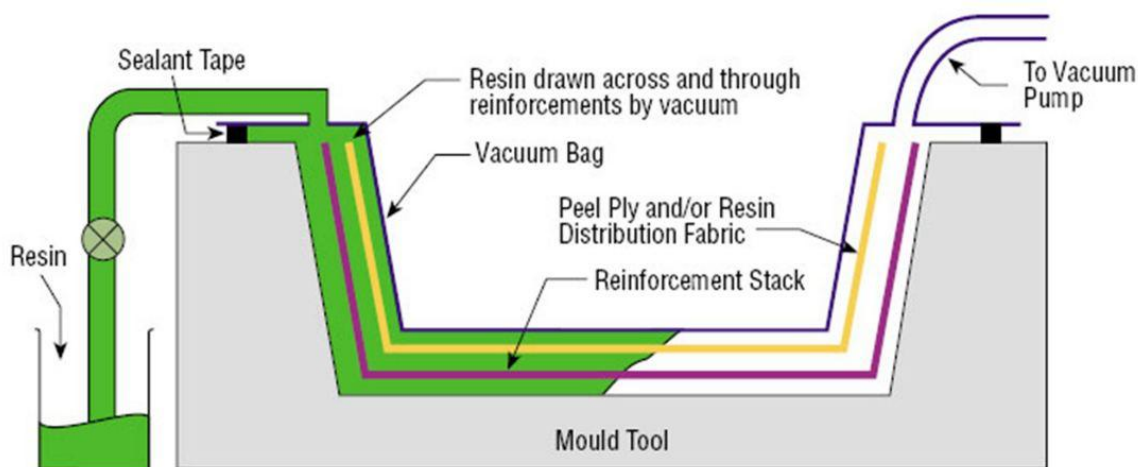
Матрице: епоксидне смоле, полиестери и винил естери. Као ојачања могу послужити све врсте влакана.

Предности:

- много мањи трошак израде алата, будући да као горњи део калупа служи покривач из којег се исисава ваздух,
- могућа је производња делова великих димензија,
- могуће је и коришћење алата који се иначе примењују у поступку ручног полагања.

Недостаци:

- извођење процеса је релативно сложено,
- морају се користити смоле мале вискозности,
- могућа је појава локалитета у које није импрегнирана смола (шкарт).



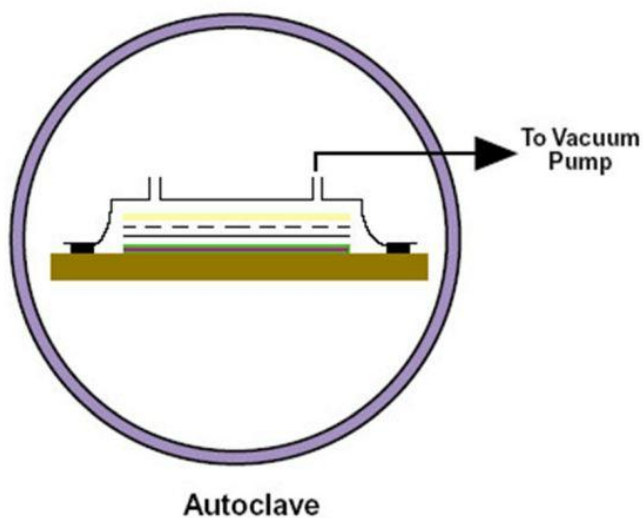
Слика 5.17. Приказ поступака убризгавања

5.2.7. Препрег

Различита влакна или ткања се предимпрегнирају смолом (слика 5.18.). 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 (машински) полажу у калуп, вакуумски се пакују и загревавају при 120-180 °С. Ако је за постизавање бољих својстава композита потребан нешто виши притисак (до 5 бара) све се то ставља у аутоклав.

Матрице: епоксидне смоле, полиестери, феноли и високотемпературни пластомери као што су нпр. полиимиди.



Слика 5.18. Препрег

Предности:

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

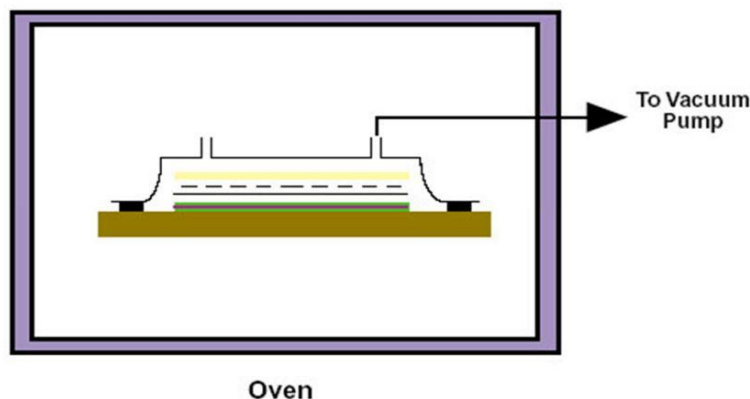
Главни недостаци:

- трошкови материјала су већи,
- материјал се укрути у аутоклавама које су прилично скупе и ограничених су димензија,
- процес се одвија на повишеним температурама тако да и то треба узети у обзир приликом избора материјала алата.

Очвршћавање препрега при нижим температурама

Користе се хемијски додаци који омогућују очвршћавање при нешто нижим температурама 60-100 °C (слика 5.19.). Могућа је примена само вакуумског паковања без аутоклаве.

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



Слика 5.19. Препрег при нижим температурама

Предности:

- могу се користити јефтинији материјали за израду алата (нпр. дрво) будући да су температуре за крутост нешто ниже,
- због релативно једноставне опреме могућа је израда делова већих димензија,
- мањи трошак енергије.

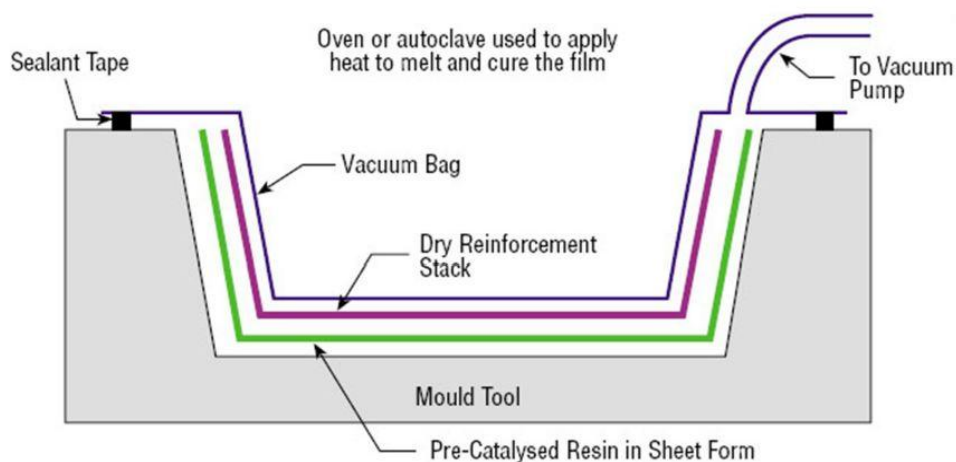
Недостаци:

- већа цена материјала,
- ипак је потребна опрема (пећ и вакуумско паковање),
- алат мора издржати температуре од 60-100 °C.

5.2.8. Инфузија слоја смоле (RFI - Resin Film Infusion)

У калуп се постављају сува ојачања између којих се постављају слојеви смоле која је у полукрутом стању (слика 5.20.). Смола се налази на специјалном папиру. Помоћу вакуум пумпе се извлачи зрак након чега следи загревавање чиме се смола доводи у текуће стање и даље испуњава простор између ојачања.

Користе се све врсте влакнастих ојачања и епоксидних смола.



Слика 5.20. Приказ поступака инфузије слоја смоле

Предности:

- производња еколошки прихватљивих композита с 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:

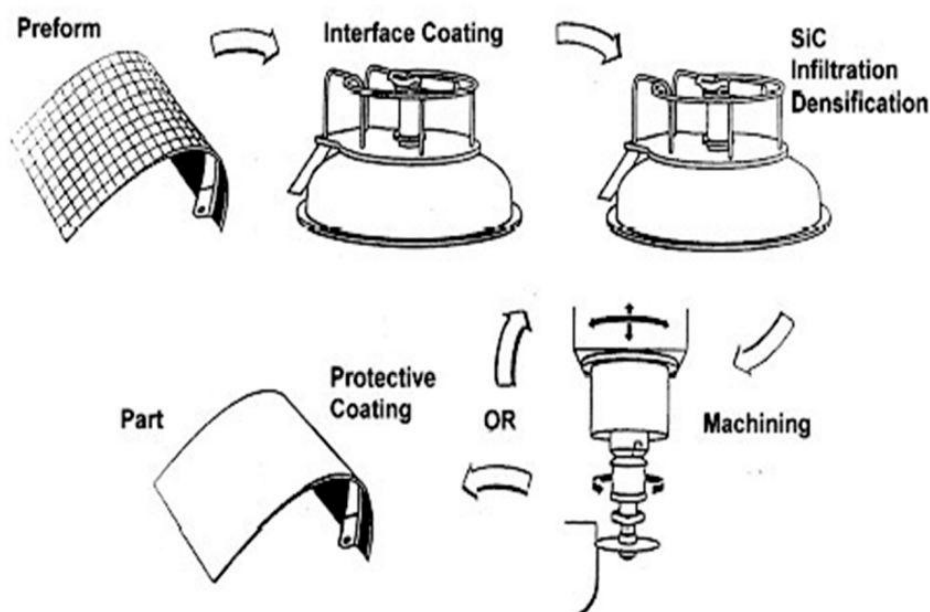
- примењује се једино у авио индустрији,
- потребна је пећ и вакуумско паковање,
- алат мора издржати температуре од 60-100 °C.

5.3. Добијање композита са керамичком основом

За добијање композита са керамичком основом користе се поступци:

- ЦВД напаравање (CVD - Chemical Vapour Deposition),
- усмерена оксидација метала,
- производња SiC/SiC композита импрегнацијом полимера и пиролизом,
- инфилтрација истопљеног материјала.

5.3.1. ЦВД напаравање (CVD - Chemical Vapour Deposition)



Слика 5.21. Приказ поступака ЦВД напаравања

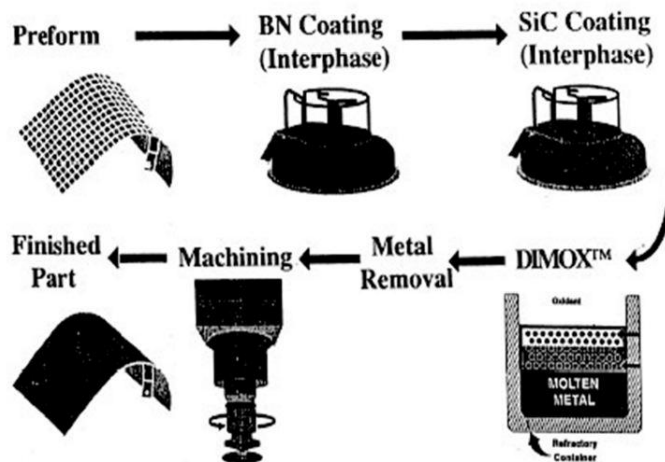
Хемијско напаравање (ЦВД) је хемијски процес који се користи за производњу високе чистоће, високих перформанси чврстог материјала. Процес се често користи у индустрији полупроводника за производњу танких филмова. У типичном (ЦВД-у), подлога је изложена једном или више испарљивих гасова, који реагују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

(ЦВД) се такође користи за производњу синтетичких дијаманата.

5.3.2. Усмерена оксидација метала

Најпре се ЦВД поступком напаравања наноси превлака на ојачивач.

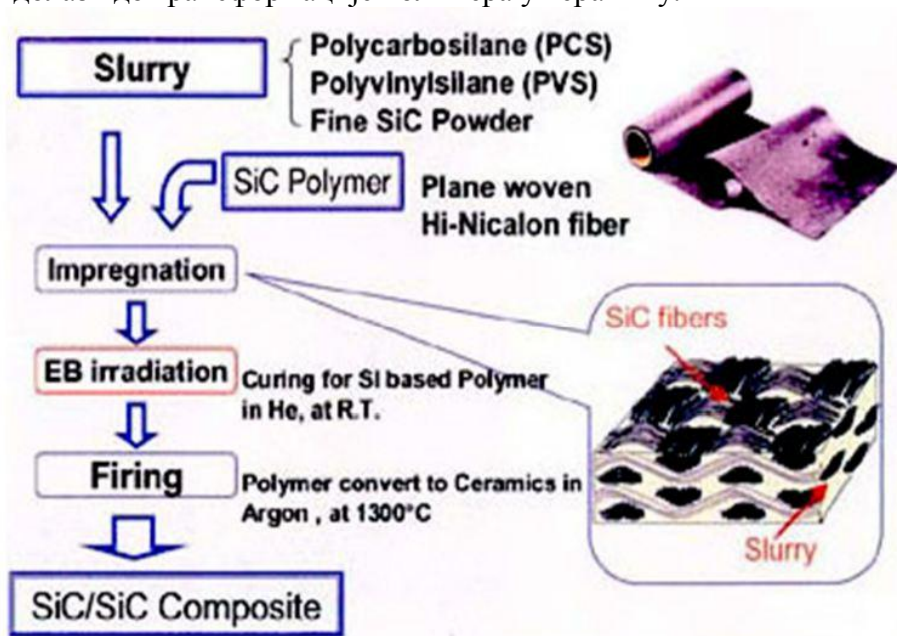
Након тога се ојачивач с превлаком ставља у растопљени метал у реактивној атмосфери кисеоника при чему долази до стварања $\text{Al-Al}_2\text{O}_3$ матрице.



Слика 5.22. Приказ поступака усмерене оксидације метала

5.3.3. Производња SiC/SiC композита импрегнацијом полимера и пиролизом

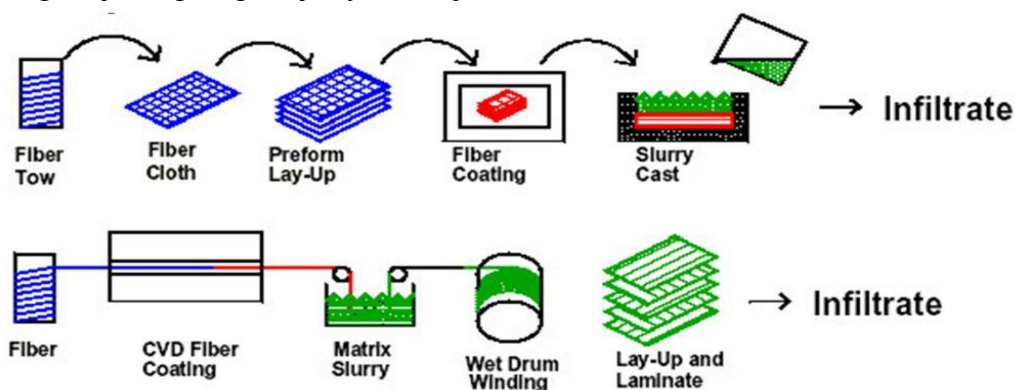
Суспензија од PCS (Polikarbosilan) и PVS (Polivinilsilan) импрегнира се у SiC тканину. Након тога полимерни материјал умрежава под деловањем снопа електрона. Пиролизом долази до трансформације полимера у керамику.



Слика 5.23. Приказ поступака производње SiC/SiC композита импрегнацијом полимера и пиролизом

5.3.4. Инфилтрација истопљеног материјала

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.



Слика 5.24. Приказ поступака инфилтрације истопљеног материјала

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

5.4. 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 супстанције 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 супстанције 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:

1. пиролиза чврсте масе,
2. пиролиза течне масе,
3. пиролиза гасовите масе.

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

5.4.1. Добијање C-C композита пиролизом чврсте масе

Поступак ове производње се одвија у следећим корацима

1. припрема предоблика влакана ојачивача – 1D, 2D, 3D или n-D влакна,
2. пиролиза чврсте дуромерне смоле у пећи на температури 1000-1500 °C, да испаре из смоле сви елементи осим угљеника – карбонизација,
3. 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,
4. вишеструко понављање (од 1-4 пута) горњих корака (2 и 3) – споро и скупо.
 5. топлотна обрада 1500-2200 °C за добијање завршног облика.

5.4.2. Добијање С-С композита пиролизом течне масе

Поступак ове производње се одвија у следећим корацима

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

5.4.3. Добијање С-С композита пиролизом гасовите масе

Поступак ове производње се одвија у следећим корацима:

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

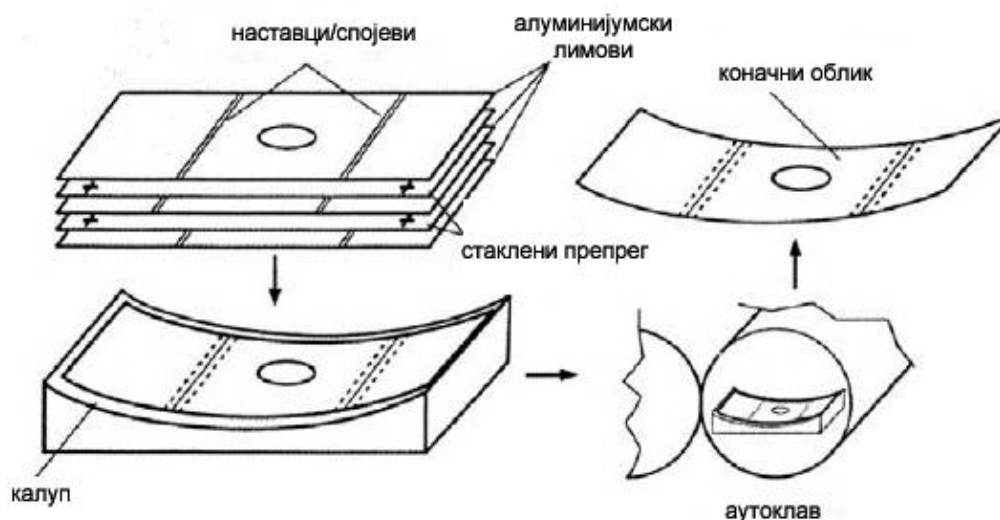
Алтернативни пут: CVD, али врло скупо.

5.5. 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, (слика 5.25.). "Glare" ламинати садрже алуминијумске лимове додатно

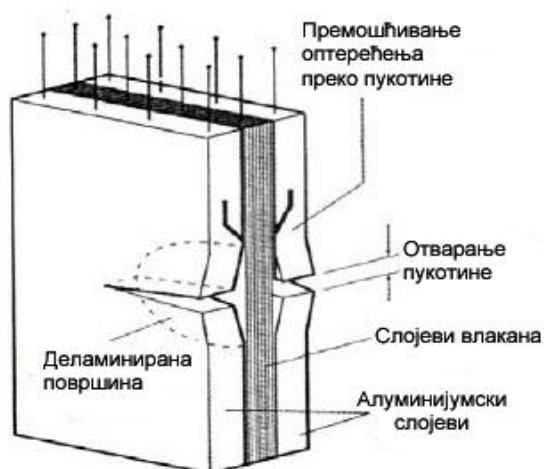
ојачане стакленим влакнима. Полагањем препрека (стаклене тканине натопљене полимерном смолом) између алуминијумских лимова добија се вишеслојна структура која садржи неколико редова ојачања.



Слика 5.25. Поступак производње "glare" ламината

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 снап стаклених влакана успешно премошћава пукотину и на тај начин успорава или спречава њено ширење, (слика 5.26.).



Слика 5.26. "Glare" ламинат - премошћавање пукотине слојем стаклених влакана

"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 мм 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.

5.6. Сендвич конструкције

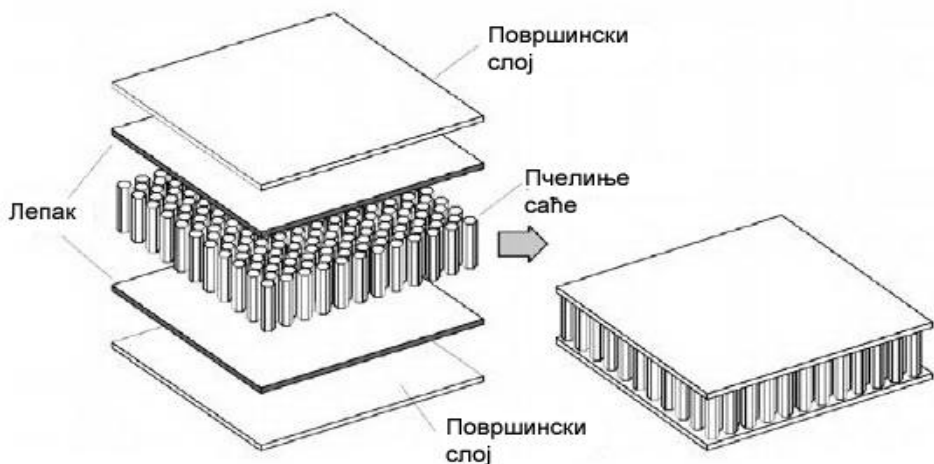
Сендвич конструкције састоје се од два чврста и крута танка спољна слоја између којих се налази лаки материјал који чини језгро. Захваљујући малој маси одликује их висока специфична чврстоћа и висока специфична крутост.

Као материјали језгра користе се:

1. полимерне пене од поливинил-хлорида (PVC), полистирена (PS), полиуретана (PUR), полиетеримида (PEI), акрилне пене; примењују се пене густине од 40 до 200 kg/m^3 и дебљине 5 до 50 mm;
2. алуминијум или полимерни композити (арамидна влакна у комбинацији са акрилнитрил/бутadiен/стеаренском (ABS), поликарбонатном (PC), полипропиленском (PP) или полиетиленском (PE) матрицом) у изради саћа;
3. дрво (балза, кедар).

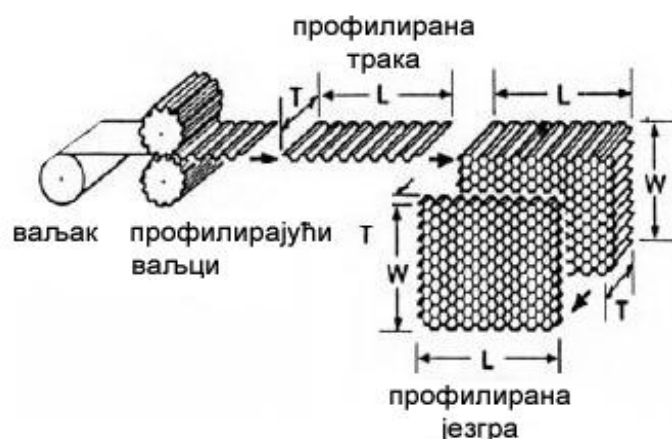
Површински слојеви могу бити, а често и јесу, направљени од материјала веће чврстоће и крутости. За спољне слојеве преферирају се легуре алуминијума, полимерни композити ојачани влакнима, титанове легуре и челик.

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, (слика 5.27.). Тиме се добија врло постојан, крут, чврст и изузетно лак сендвич који је захваљујући својим предностима широко применљив у изради ваздухопловних конструкција.



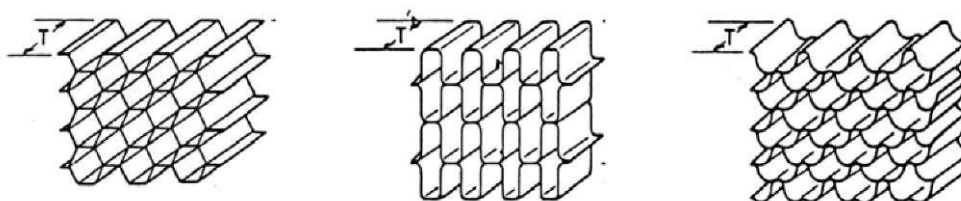
Слика 5.27. Композитни сендвич са језгром у облику пчелињег саћа

Слика 5.28. приказује начин производње саћастих алуминијских језгра поступком профилисања.



Слика 5.28. Производња саћастих алуминијумских језгра профилисањем

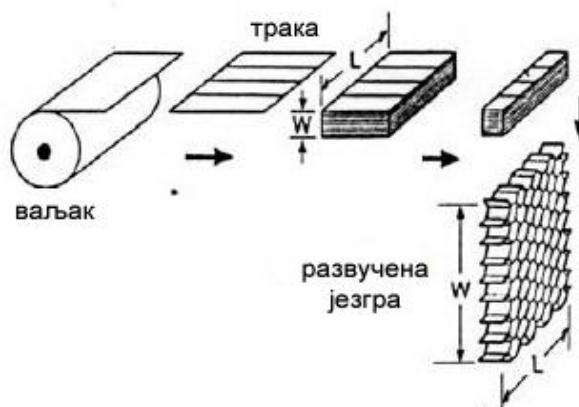
Ваљане алуминијске фолије или лимови обликују се провлачењем кроз профилисане ваљке и тако профилисани међусобно спајају стварајући структуру са шестоугло обликованим ћелијама. Осим хексагоналног облика ћелија могући су и други облици зависно од начина профилисања, (Слика 5.29.).



Слика 5.29. Облици језгра алуминијумског композитног сендвича

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 израдити и лепљењем танких алуминијумских трака на изолованим (појединачним) местима. Тако повезани слојеви затим се развлаче у одређеном смеру чиме настаје ћелијска структура, (слика 5.30.).



Слика 5.30. Производња саћастих алуминијумских језгра развлачењем

Композитни сендвичи саћастиг 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 коришћен је код Еирбасових авиона А380 у изради избочених делова оплате који спајају тело и крило.

5.6. Поступци производње биокомпозита

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

А то су:

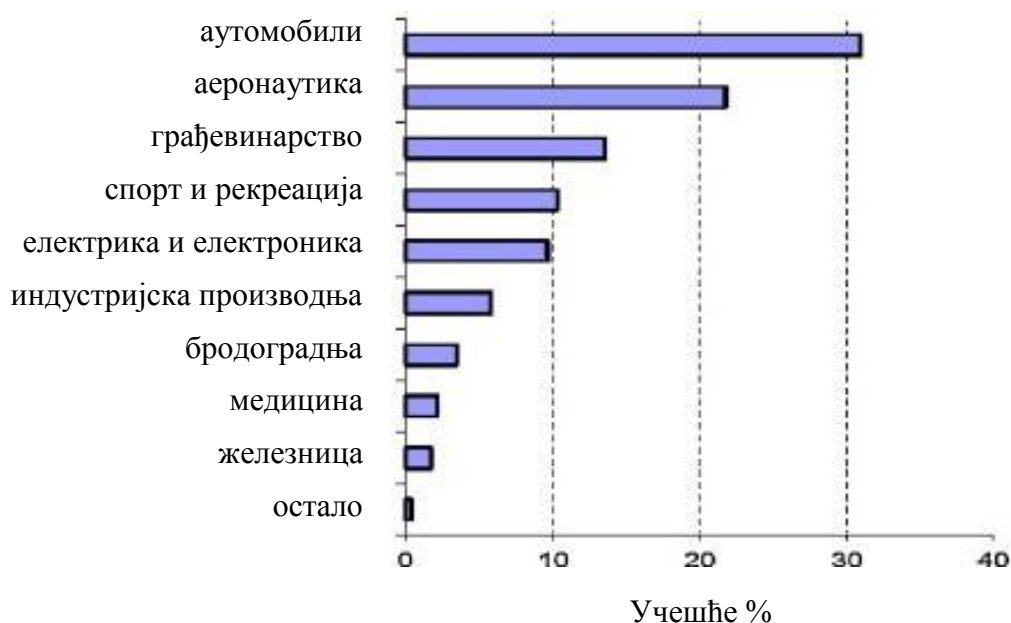
- Напрскавање,
- Ручно полагање (аутоматско ламинирање),
- Пултрудирање (40-70 % ојачивача),
- RTM (Resin Transfer Moulding),
- Намотавање (Filament Winding),
- Препрег.

6. Примена композитних материјала

Побољшане особине композитних материјала пружају могућност њихове широке примене. Упоследњим деценијама направљено је мноштво нових са неким изузетно корисним особинама. 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 дијелова, 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 - ховеркрафти, бродови за спасавање, патролни бродови, мале рибарице, рибарски бродови, опрема за искрцавање, миноловци, регатне броднице, броднице за забаву, кануи, ...),
- медицини (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 следећој слици 6.1. је дат вредносни удео композитних материјала у разним врстама индустрија које их користе.



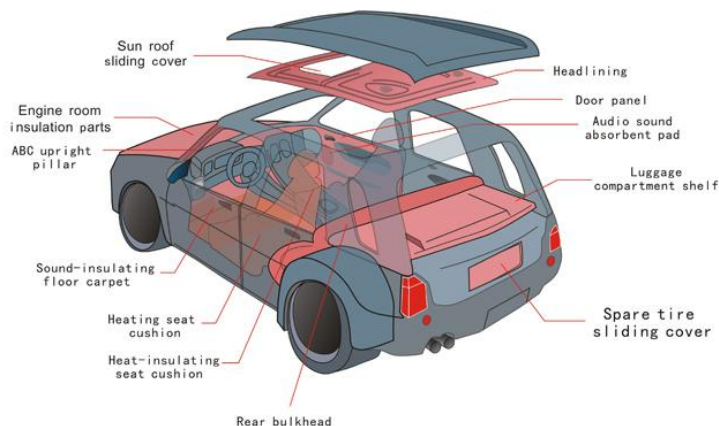
Слика 6.1. Удео композитних материјала у индустријским производима

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

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.

6.1. 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 кочницама, ...; и мање одговорних делова: унутрашње облоге, пресвлаке седишта, ... начињених од композитних материјала (слика 6.2.).



Слика 6.2. Делови путничког аутомобила начињени од композитног материјала

На слици 6.3. је дат пример употребе композитних материјала у изради носеће структуре високооптерећеног спортског аутомобила Астон Мартин В12 (Aston Martin V12 Vanquish).



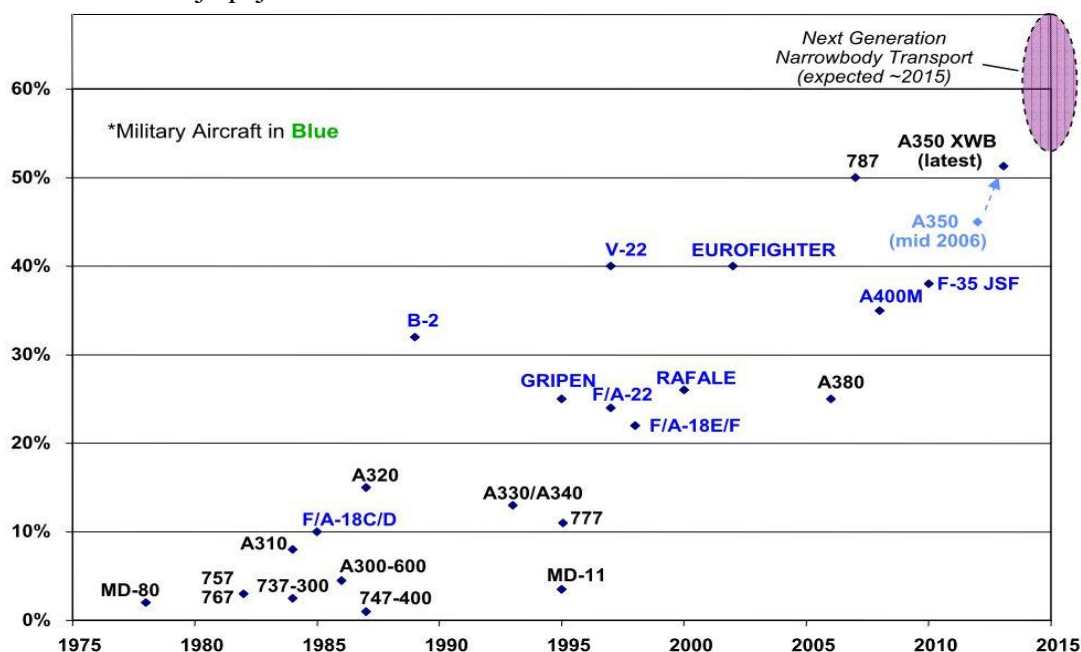
Слика 6.3. Композитни материјал у савременом спортском аутомобилу Aston Martin V12 Vanquish

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

6.2. 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.

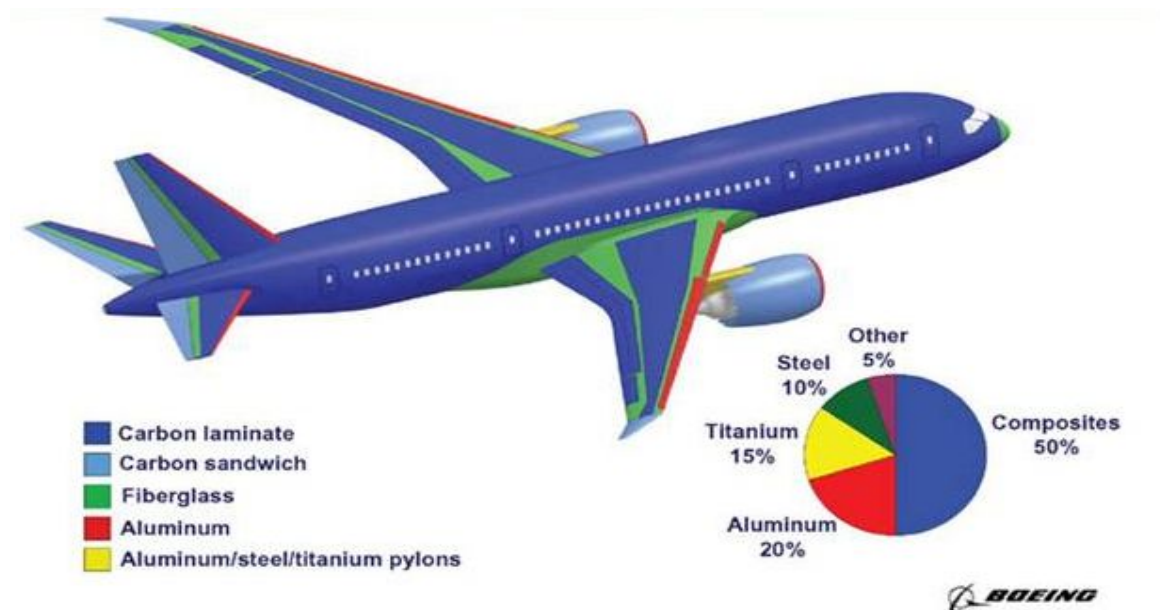
Употребом композитних материјала у изради авионских конструкција значајно се може смањити тежина авиона и тиме остварити мања потрошња горива или је могуће повећати корисну носивост на рачун мање тежине што опет повољно утиче на смањење трошкова. Следећа предност композита је њихова могућност обликовања у израстке сложеног облика чиме се смањује не само број позиција неког склопа, већ и потреба за причвршћавањем и спајањем. Предности су двоструке: уз мањи број позиција скраћује се време потребно за монтажу, али се смањује и број потенцијално опасних места иницирања пукотине 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 6.4. Процентни удео композитних материјала у савременим путничким авионима (извор: Боинг)

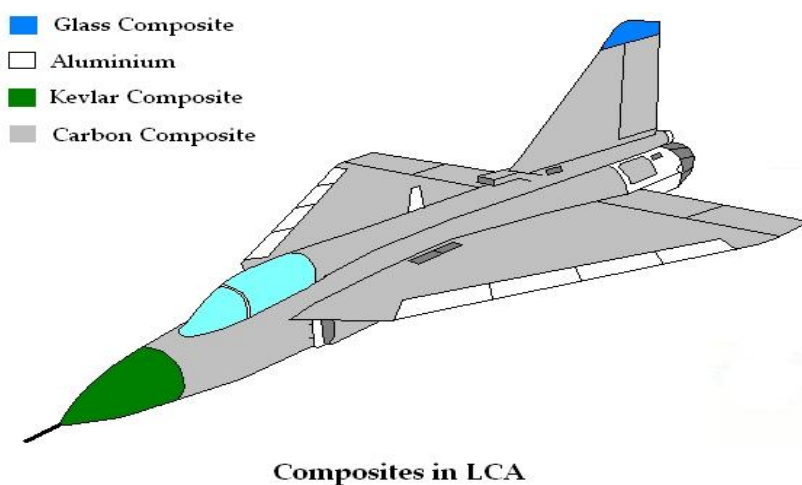
И напослетку треба истаћи да су то материјали који се могу дизајнирати (пројектовати) у циљу постизања управо онаквих својстава каква се траже код одређене примене, а која нису остварљива код материјала компонената. Због свега тога композити представљају успешну алтернативу конвенционалним металним материјалима 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 6.4.).

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 6.5.).



Слика 6.5. Места употребе композитних материјала у савременим путничким авионима (извор: Боинг)

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 6.6).

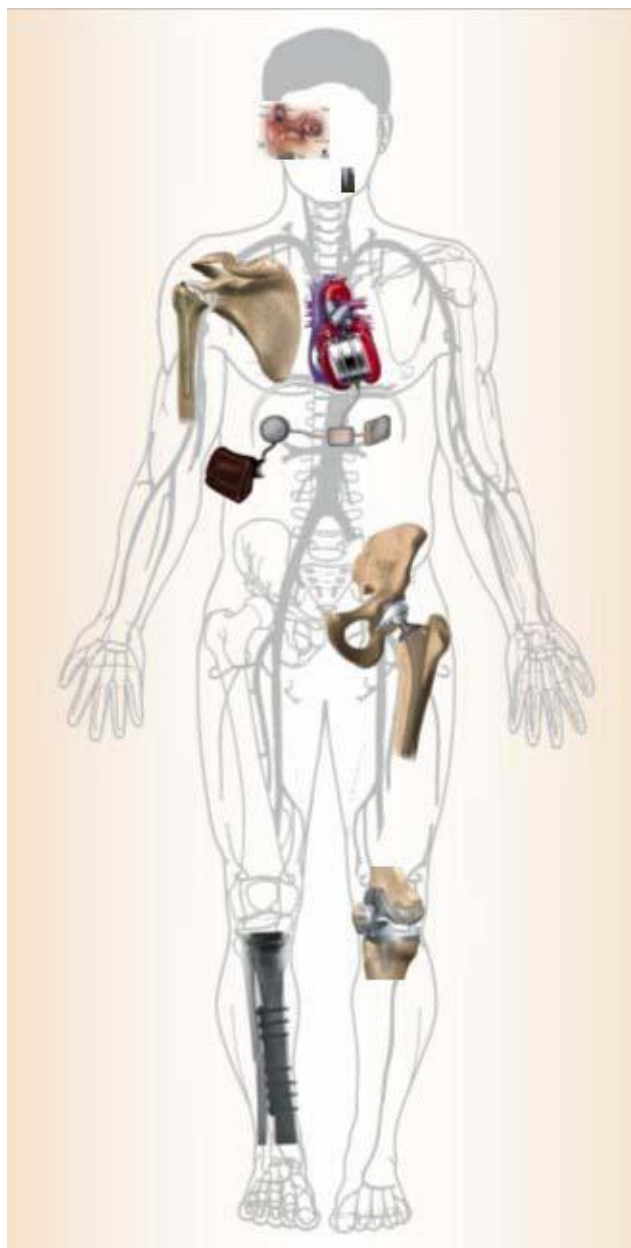


Слика 6.6. Места употребе композитних материјала у савременим борбеним авионима

Велико је учешће композитних материјала и у пројектима које НАСА (NASA) планира у будућим освајањима свемира, а који се сада испитују, тестирају и усавршавају.

6.3. Примена композитних материјала у медицини

Композити метал-керамика, или угљеник-угљеник, су погодни за примену у медицини јер су биокompatibilни, отпорни на корозију, хемијски инертни и добро подносе напрезање на истезање. Они се користе за израду вештачких импланата, попут срчаних зализака, кукова, импланата колена и др. (слика 6.7.).



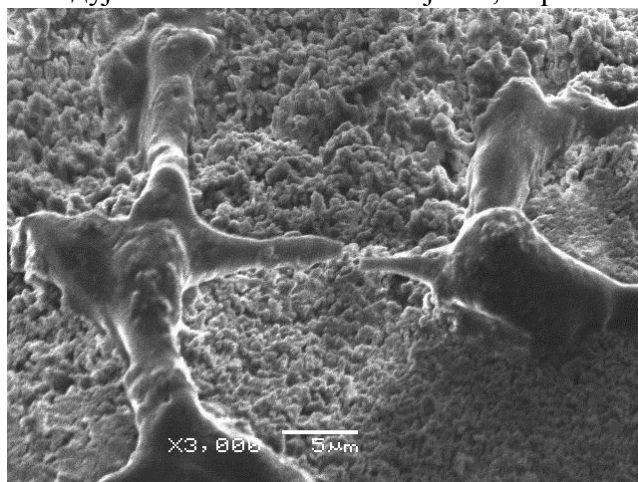
Слика 6.7. Шта се све данас реконструише уз помоћ композита (биоматеријала)

Срчани зализци 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. Механичке особине 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 биокompatibilним полимерима синтетисан је композитни биоматеријал који се с правом може назвати „ВЕШТАЧКА КОСТ“ (слика 6.8.). 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 6.8. Предклиничка истраживања: ћелије фибробласта „уживају“ на биоматеријалу

Концепт овог биоматеријала и имплантата 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 (умируе) 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 фиксни протетичке надоградње, 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 6.9. Лаички, рестауративна стоматологија бави се надоградњом зуба ради обнављања функције жвакања или у естетске сврхе.



Слика 6.9. Изглед поправљеног зуба извршен композитним материјалом (лево) у односу на класични материјал пломбе (десно)

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 pH (pH) пљувачке при томе варира од 4 до 8,5. Кисела пића или неки лекови могу тај pH знатно променити, па су тако забележене вриједности pH 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 те 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. Може се ићи у смеру примене других процеса синтезе материјала, нпр. сол-гел процеса, или према употреби нових материјала попут биоактивних органских матрица, односно према укључивању аморфних калцијумових фосфата у пуниоц како би дошло до селективног отпуштања активних јона потребних за обнављање тврдог зубног ткива, чиме би се повећало заштитно деловање композитног материјала.

7. Закључак

Класични материјали претежно поседује добре хемијске и физичке особине (механичке, триболошке, електричне, ...). Међутим, најчешћи је случај да поседују и неко одступање у потребним особинама 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“ особина.

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 жељене особине 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, течност и гасовито. Тиме је приказан и технолошки пут употребе композита у зависности од жерљених особина.

Конструктивна 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 стаје ако бисмо изузели делове начињене од композита.

Један од најбрже растућих сегмената индустрије композита је подручје копног 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 јефтини и лагани, поправка им је лако изводива. Угљенична влакна су још увијек намијењена 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. Употреби модерних композита погодоваће Директива 2000/53/ЕЦ

Европске уније, која тражи да земље чланице до 2015. године искористе и рециклирају 95 % отпадних возила. Већ је почела производња спољних делова која води према будућим конструкцијама ултраликих 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 искориштења 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.

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

- [7.] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [8.] D. Hull: An Introduction to Composite Materials, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1992.
- [9.] R.M.Jones: Mechanics of composite materials, Taylor & Francis, 1999
- [10.] RE Smallman, AHW Ngan: Physical metallurgy and advanced materials, Elsevier, 2007.
- [11.] Ivica Smojver: Mehanika kompozitnih materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [12.] A. Brent Strong: HISTORY OF COMPOSITE MATERIALS - OPPORTUNITIES AND NECESSITIES, Brigham Young University,
- [13.] Brian Harris: Engineering Composite Materials, The Institute of Materials, London, 1999.
- [14.] 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.
- [15.] Tomislav Filetin, Gojko Marić: Postupci proizvodnje kompozita, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2013.
- [16.] Franjo Kovačiček, Irena Žmak: Metalni kompoziti, MATRIB2004, Velja Luka, 2004.
- [17.] Vineta Srebrenkoska: EKO KOMPOZITNE MATERIJALE, Kurs održive tehnologije u hemijskoj, prehrambenoj i farmaceutskoj industriji, Novi Sad, 2012
- [18.] www.ccat.us –Септембар 2013. године.